

# UNIVERSITY OF THESSALY

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

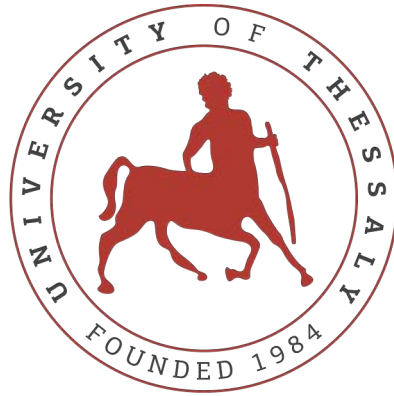
**Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:**  
"ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ  
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ"  
"DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SPECTRUM  
MONITORING PLATFORM FOR WIRELESS NETWORKS"

Καραπαναγιωτίδης Ιωάννης

**Επιβλέπων Καθηγητής:**  
Αθανάσιος Κοράκης  
Φώτιος Πλέσσας

Βόλος, Μάρτιος 2019





# UNIVERSITY OF THESSALY

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

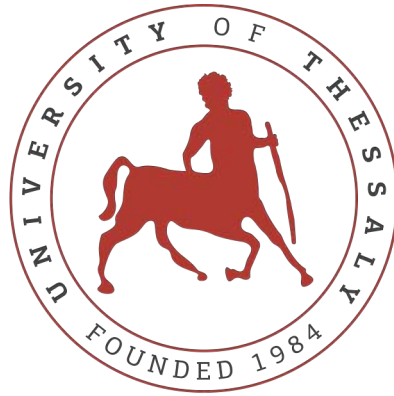
**Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:**  
"ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ  
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ"  
"DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SPECTRUM  
MONITORING PLATFORM FOR WIRELESS NETWORKS"

Καραπαναγιωτίδης Ιωάννης

**Επιβλέπων Καθηγητές:**  
Αθανάσιος Κοράκης  
Φώτιος Πλέσσας

Βόλος, Μάρτιος 2019





# UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER  
ENGINEERING

**Title of Diploma Thesis :**  
"DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SPECTRUM  
MONITORING PLATFORM FOR WIRELESS NETWORKS"

Karapanagiotidis Ioannis

**Supervisor:**  
Thanasis Korakis  
Fotios Plessas

Volos, March 2019



## Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες η χρήση των συσκευών με ασύρματες τεχνολογίες έχει γνωρίσει ραγδαία αύξηση, ολοένα και περισσότεροι χρήστες απασχολούν μέρος του ασύρματου φάσματος για να επιτύχουν επικοινωνία. Σε ένα ακραίο σενάριο όλοι οι χρήστες δρουν απερίσκεπτα μεταδίδοντας πληροφορία, υπερφορτώνοντας το περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων και δημιουργώντας σημείο συμφόρησης με αρνητικές επιπλοκές. Έτσι προκύπτει η ανάγκη ενός συστήματος ραδιοεπικοινωνιών όπου έχει την δυνατότητα να προσαρμοστεί στις συνθήκες που επιβάλλουν οι πολυάριθμοι χρήστες. Πρωταρχικό στοιχείο που απαιτείται να διαθέτει ένα τέτοιο σύστημα είναι το spectrum sense δηλαδή, ανιχνεύει την ύπαρξη παράλληλων εκπομπών και με σωστή συνεργασία μεταξύ αυτών επιτυγχάνεται η αποφορτίσει του ασύρματου μέσου, κατανέμοντας τις εκπομπές στον χρόνο και στον χώρο. Σε αυτή την διπλωματική παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας πλατφόρμας που προσφέρει την δυνατότητα παρακολούθησης του φάσματος, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξή της πλατφόρμας είναι το GNU Radio και το USRP, προσφέρουν ένα ευέλικτο σύστημα ραδιοεπικοινωνιών, που μέσα από εργαστηριακές δοκιμές και πειραματισμό καταλήξαμε στο τελικό αποτέλεσμα.

## Abstract

Over the last few decades the use of wireless devices has risen rapidly, more and more users are using part of the wireless spectrum to achieve communication. In an extreme scenario users are recklessly transmitting information, overloading the limited frequency spectrum and creating a bottleneck with negative complications. Thus, the need for a radio system where it is capable of adapting to the conditions imposed by the numerous users arises. The primary element required to have such a system is the spectrum sense, that is, it detects the existence of parallel transmission and with proper cooperation between them the discharging of the wireless medium is achieved, dividing the transmission into time and space. This thesis presents the design and implementation of a platform that offers the possibility of spectrum monitoring. The tools used for the development of the platform are GNU Radio and USRP offer a flexible radio communication system, which through laboratory testing and experimentation ended up with the final result.





## Πίνακας περιεχομένων

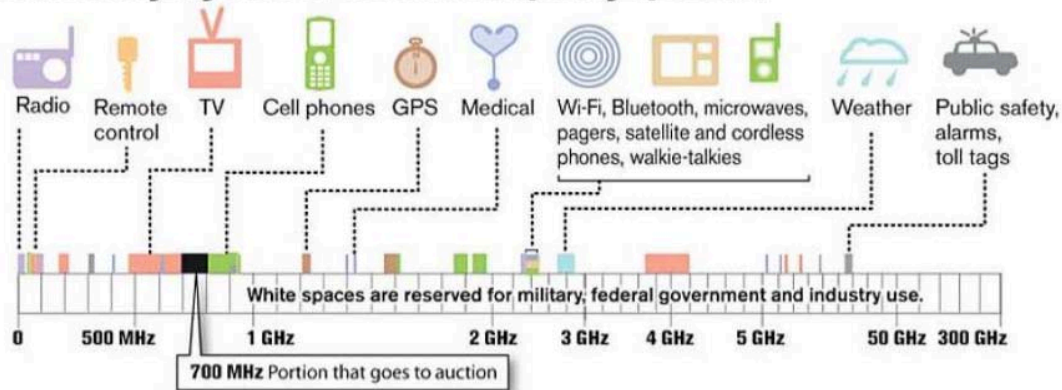
<b>Περίληψη</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
<b>1) Εισαγωγή</b> .....	<b>2</b>
1.1) Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα/Ασύρματες τεχνολογίες.....	2
1.2) <i>Cognitive Radio</i> .....	3
1.3) <i>Software Defined Radio</i> .....	3
1.4) <i>Gnu Radio</i> .....	4
1.5) <i>Universal Software Radio Peripheral (USRP)</i> .....	5
<b>2) Υπόβαθρο</b> .....	<b>6</b>
2.1) Μέθοδοι παρακολούθησης.....	6
2.2) Εξοπλισμός.....	7
2.3) Αλγόριθμος.....	8
2.4) Νέα στοιχεία.....	9
<b>3) Πειράματα</b> .....	<b>11</b>
3.1) Τοπολογία.....	11
3.2) <i>Wi-Fi</i> .....	12
3.3) <i>Narrowband</i> .....	24
3.4) <i>LTE</i> .....	33
3.5) Παρακολούθηση φάσματος χωρίς αλλαγή συχνότητας.....	46
<b>4) Συμπεράσματα</b> .....	<b>59</b>
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>60</b>

# 1) Εισαγωγή

## 1.1) Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα/Ασύρματες τεχνολογίες

Ξεκινώντας επιβάλλεται να μιλήσουμε για το φάσμα συχνοτήτων, είναι ένα υποσύνολο του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με συχνότητες που κυμαίνονται από 30 Hertz (30Hz) μέχρι 300 Gigahertz. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αυτής της περιοχής χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο από σύγχρονες τεχνολογίες όπως (Wi-Fi, Bluetooth, LTE, TV ) και ιδιαίτερα στον τομέα των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων[1].

### Some everyday uses of the radio frequency spectrum



Sources: New America Foundation, FCC

The Boston Globe

Εικόνα 1. 1. 1

Για να πραγματοποιηθεί επικοινωνία σε ασύρματο επίπεδο πάνω στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα προσαρτάται πληροφορία αποστέλλεται από έναν κόμβο πομπό σε έναν κόμβο δέκτη και αντίστροφα. Για να πραγματοποιηθεί η ανταλλαγή μηνυμάτων πρέπει να υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών χρηστών έτσι η χρήση του φάσματος συχνοτήτων ρυθμίζεται από εθνικούς νόμους, συντονισμένους από διεθνή οργανισμό, τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU). Έτσι η ITU κατανέμει το φάσμα συχνοτήτων σε περίπου 40 υπηρεσίες ραδιοεπικοινωνιών και σε ορισμένες περιπτώσεις κομμάτια του φάσματος πωλούνται ή η άδεια εκμετάλλευσής τους παραχωρείται σε ιδιωτικές υπηρεσίες όπως φορείς κινητής τηλεφωνίας και τηλεοπτικούς σταθμούς .

## 1.2) Cognitive Radio

Αυτό που προκύπτει σαν συμπέρασμα είναι ότι το φάσμα συχνοτήτων είναι ένας σταθερός πόρος χωρίς περιθώρια εξέλιξης σε αντίθεση με την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση που δημιουργούν οι πολυάριθμοι χρήστες. Με βάση τον περιορισμό που επιβάλλει το φάσμα δημιουργείται η ανάγκη ανάπτυξης ενός ευφυούς συστήματος Cognitive Radio[2]. Είναι ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνίας που μπορεί να προγραμματίσει και να ρυθμιστεί δυναμικά ώστε να γίνει βέλτιστη εκμετάλλευση του φάσματος και να αποφευχθούν παρεμβολές και συμφορήσεις χρηστών στα ασύρματα κανάλια.



Εικόνα 1. 2. 1

Ένα τέτοιο σύστημα διαθέτει μηχανισμούς ανίχνευσης του φάσματος, έτσι γνωρίζοντας τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον το σύστημα είναι σε θέση να λάβει τις βέλτιστες αποφάσεις, προς όφελος του ιδίου και του κοινού συνόλου και να ρυθμίσει τις παραμέτρους μετάδοσης και λήψης ώστε να πετύχει μια ομαλή επικοινωνία.

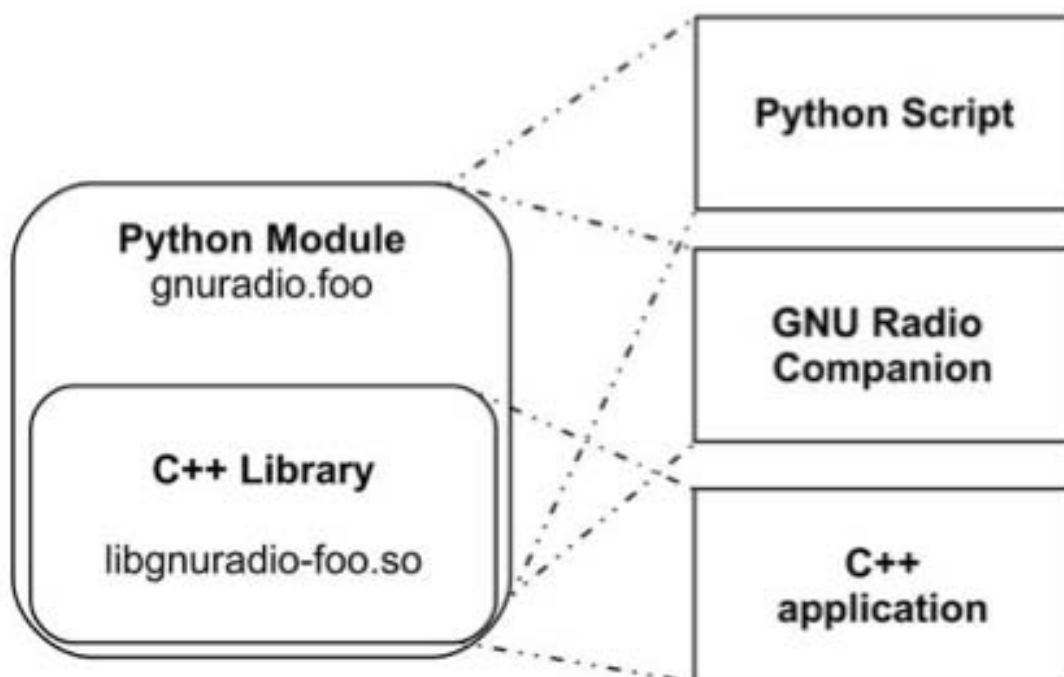
## 1.3) Software Defined Radio

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός Cognitive Radio είναι ύπαρξη ενός ευέλικτου συστήματος. Στην προκειμένη περίπτωση υπάρχει το Software Defined Radio (SDR) μιλάμε για ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνίας, στο οποίο οι λειτουργίες και τα εξαρτήματα που είναι απαραίτητα για την αποστολή, για την λήψη και για την επεξεργασία ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος, καθορίζονται εξολοκλήρου από το λογισμικό σύστημα που μπορεί

να υπάρχει σε ένα προσωπικό υπολογιστή ή σε ένα ενσωματωμένο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα βασικά συστατικά που παραδοσιακά καθορίζονταν από το υλικό όπως μίκτες , φίλτρα διαμορφωτές τώρα υλοποιούνται από το λογισμικό σύστημα[3]. Αυτός είναι και ένας βασικός λόγος της συχνής χρήσης του συστήματος ραδιοεπικοινωνίας ,δηλαδή η ευελιξία που προσφέρει στην δοκιμή νέων και διαφορετικών τεχνολογιών πολύ γρήγορα χωρίς να απαιτείτε δραματική αλλαγή του υλικού. Μαζί με τα θετικά χαρακτηριστικά του SDR πρέπει να αναφερθούν και αρνητικά στοιχεία, όπως το γεγονός ότι το σύστημα καταναλώνει μεγάλο ποσό ενέργειας για την διεκπεραίωση απαιτητικών και πολυάριθμων υπολογισμών και το ακριβό αρχικό κόστος του εξοπλισμού λόγω της πολυπλοκότητας που διαθέτει.

## 1.4) Gnu Radio

Το GNU Radio είναι ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα που παρέχει στους χρήστες του, δομή και εργαλεία για την κατασκευή και τη λειτουργία γενικών εφαρμογών επεξεργασίας σημάτων. Οι εφαρμογές του GNU Radio είναι γνωστές ως flowgraphs, οι οποίες είναι μια σειρά μπλοκ επεξεργασίας σημάτων που συνδέονται μεταξύ τους, περιγράφοντας έτσι μια ροή δεδομένων. Τα flowgraphs μπορούν να γραφτούν είτε σε γλώσσα C++ είτε σε Python, πολλά όμως εργαλεία που προσφέρει στους χρήστες το GNU Radio είναι γραμμένα Python[4].



Εικόνα 1. 4. 1

Ένα τέτοιο εργαλείο είναι και το `usrp_spectrum_sense.py` πάνω στο οποίο έγιναν αλλαγές για να φτάσουμε στην τελική μορφή της πλατφόρμα που σχεδιάσαμε, σε επόμενο κεφάλαιο θα διατυπωθούν αναλυτικά όλες οι αλλαγές. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι το GNU Radio είναι προϊόν και λειτουργεί υπό τους ορους της GNU General Public License (GPL) και προστατεύτε από Free Software Foundation.

## 1.5) Universal Software Radio Peripheral (USRP)

Για την σύσταση ενός συστήματος SDR μαζί με το GNU Radio συνηθίζεται να χρησιμοποιείται και ένα κομμάτι hardware το Universal Software Peripheral (USRP).

Το περιφερειακό αυτό κατασκευάζεται από την εταιρία Ettus Research LLC και αναπτύχθηκε από μια ομάδα με επικεφαλής τον Matt Ettus. Αποτελεί ένα σημαντικά φθηνό υλικό για συστήματα τηλεπικοινωνιών και συνήθως αποτελεί βασικό εργαλείο σε ερευνητικά εργαστήρια και πανεπιστήμια[5]. Οι περισσότερες συσκευές USRP συνδέονται με έναν κεντρικό υπολογιστή μέσω σύνδεσης υψηλής ταχύτητας, όπου το λογισμικό σύστημα ελέγχει τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων. Ορισμένα μοντέλα USRP διαθέτουν ενσωματωμένο επεξεργαστή που τους επιτρέπει λειτουργούν αυτόνομα.

## 2) Υπόβαθρο

### 2.1) Μέθοδοι παρακολούθησης

Καθώς η κύρια λειτουργία που εκτελεί η πλατφόρμα μας είναι η παρακολούθηση του φάσματος, αξίζει να αναφερθεί ότι η μέθοδος που επιλέχθηκε δεν ήταν ο μοναδικός. Ορισμένες από τις τεχνικές όπως αναφέρονται στην παγκόσμια βιβλιογραφία είναι η εξής:

- Energy Detector Based Sense [7][8]

Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη της πλατφόρμας. Το σήμα αναγνωρίζεται συγκρίνοντας το με ένα κατώφλι που ορίζεται από το επίπεδο θορύβου. Αυτή η προσέγγιση είναι η συνηθέστερη λόγω της χαμηλής πολυπλοκότητας και θα αναλυθεί περαιτέρω στη συνέχεια.

- Waveform-Based Sensing [7]

Σε αυτή την μέθοδο η ανίχνευση πραγματοποιείται με την συσχέτιση του μοτίβου του ληφθέντος σήματος με ένα ίδιου γνωστού αντίγραφου. Όπως μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε συστήματα με γνωστά μοτίβα σημάτων. Τέλος απόδοση του αλγορίθμου αυξάνεται καθώς αυξάνεται και το μήκος του σήματος.

- Cyclostationarity-Based Sensing [7]

Αυτή η μέθοδος ανίχνευσης βασίζεται στην ανάλυση των Cyclostationarity χαρακτηριστικών, δηλαδή ελέγχει χαρακτηριστικά του σήματος όπως η περιοδικότητα ή στατιστικά στοιχεία της μέσης τιμής του σήματος.

- Radio Identification Based Sensing [7]

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται ταυτοποίηση της τεχνολογίας μετάδοσης που χρησιμοποιούν οι χρήστες και με βάση τα χαρακτηριστικά τις κάθε τεχνολογίας εξάγονται ορισμένες χρήσιμες πληροφορίες.

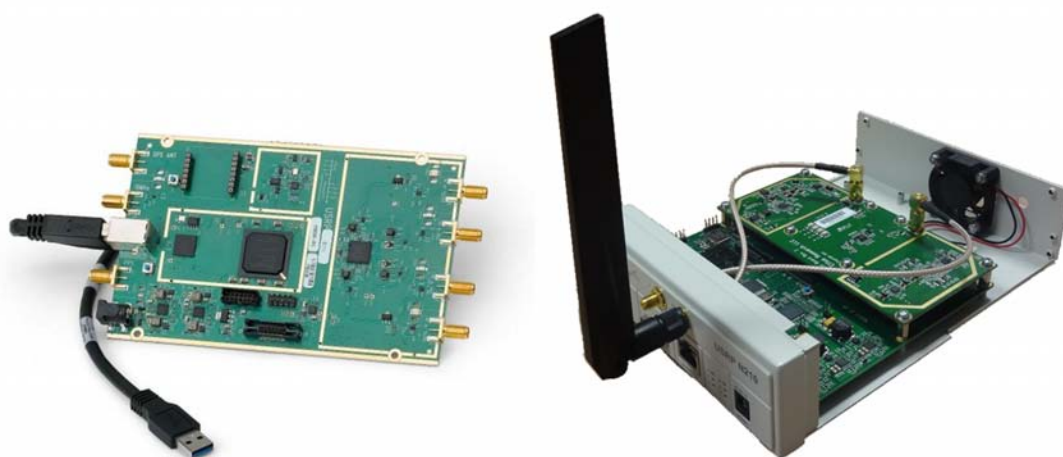
- Matched Filtering [7]

Αυτή η τεχνική ανάλυσης είναι γνωστή ως η βέλτιστη μέθοδος για την αναγνώριση πρωτογενών χρηστών, ουσιαστικά γίνεται συσχέτιση ενός αγνώστου σήματος με ένα γνωστό σήμα που κατέχουμε όλες τις πληροφορίες όπως το εύρος την συχνότητα εκπομπής και την διαμόρφωση, εάν τα δύο σήματα είναι παρόμοια μπορούν να εξαχθούν οι πληροφορίες που χρειάζονται.

Η κάθε μια μέθοδος διαφοροποιείται από άλλη ανάλογα την πολυπλοκότητα του υπολογισμού και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που προσφέρει.

## 2.2) Εξοπλισμός

Για την ανάπτυξη της πλατφόρμας παρακολούθησης στην δικιά μας περίπτωση έχουμε εξοπλιστεί με το B210, λειτουργεί σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων των 70MHz έως 6GHz,



Εικόνα 2. 2. 1

Βασικό στοιχείο είναι η Field Programmable Gateway Array (FPGA) που είναι η κύρια μονάδα επεξεργασίας του USRP στην πραγματικότητα υπάρχει για να μειώνει τον ρυθμό των δεδομένων ώστε να μπορούν να μεταφερθούν από το USB3.0. Το USB είναι και αυτό ένα κομμάτι της αλυσίδας συνδέοντας το USRP με τον υπολογιστή. Επίσης σημαντικό ρόλο κατέχουν τα εξαρτήματα Analog to Digital Converters (ADC) και Digital to Analog Converters (DAC) ,μετατρέποντας το σήμα από αναλογική μορφή σε ψηφιακή και αντίστροφα[6] .Τέλος στο USRP είναι προσαρτημένες δυο daughterboards κάθε μια αποτελείται από δύο διεπαφές την TX/RX και την RX2, όπως αποκαλύπτει και το όνομα η πρώτη διεπαφή διαθέτει μια κεραία για να δέχεται αλλά και για να στέλνει σήματα, ενώ η δεύτερη μόνο για λήψη σημάτων. Με αφετηρία τις τέσσερις διεπαφές που υποστηρίζει το USRP είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι ο εξοπλισμός έχει υποστεί αναβαθμίσεις στα εξαρτήματα των κεραιών. Έχει εφοδιαστεί με κεραιές ειδικού σκοπού οι οποίες είναι υπεύθυνες να αποδώσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την κατάσταση του φάσματος σε



συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων. Οι κεραίες που μπορούμε να βρούμε στην πρώτη daughterboard είναι οι εξής:

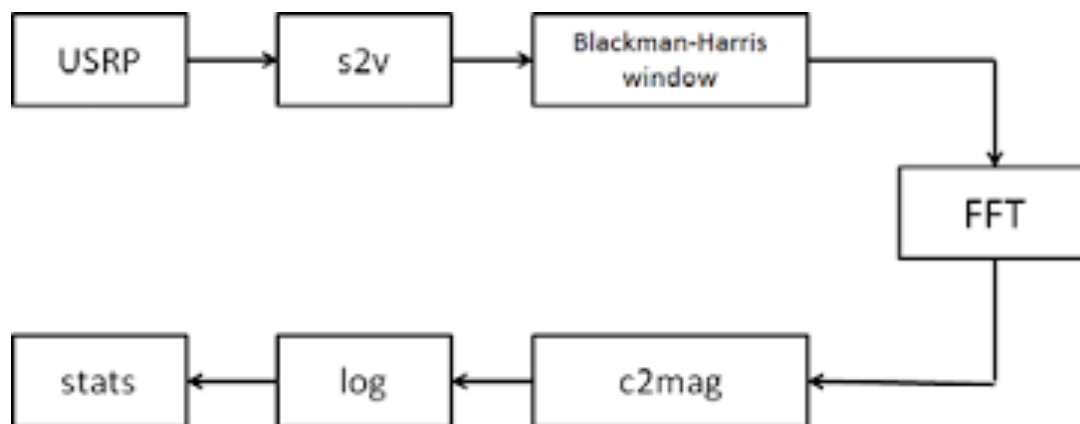
- Στην διεπαφή TX/RX καλύπτονται οι συχνότητες 2.4GHz - 2.5GHz και 4.9GHz - 5.9GHz.
- Στην διεπαφή RX2 οι συχνότητες 824GHz - 849GHz , 872GHz - 950GHz και 1.9GHz – 2.2GHz.

Ενώ στις δεύτερη daughterboard :

- Στην TX/RX το εύρος είναι 1.71GHz – 2.7GHz και
- Στην RX2 το εύρος είναι 824GHz – 960GHz και 1.71GHz – 1.99GHz

## 2.3) Αλγόριθμος

Ξεκινώντας την σχεδίαση και την ανάπτυξη της πλατφόρμας βασιστήκαμε σε ένα πρόγραμμα που προσφέρει το GNU Radio και είναι γραμμένο σε Python .Το `usrp_spectrum_sense.py` μπορεί κάποιος να το βρει `gnuradio/gr-uhd/example/python` και πραγματοποιεί παρακολούθηση φάσματος σε περιοχή.



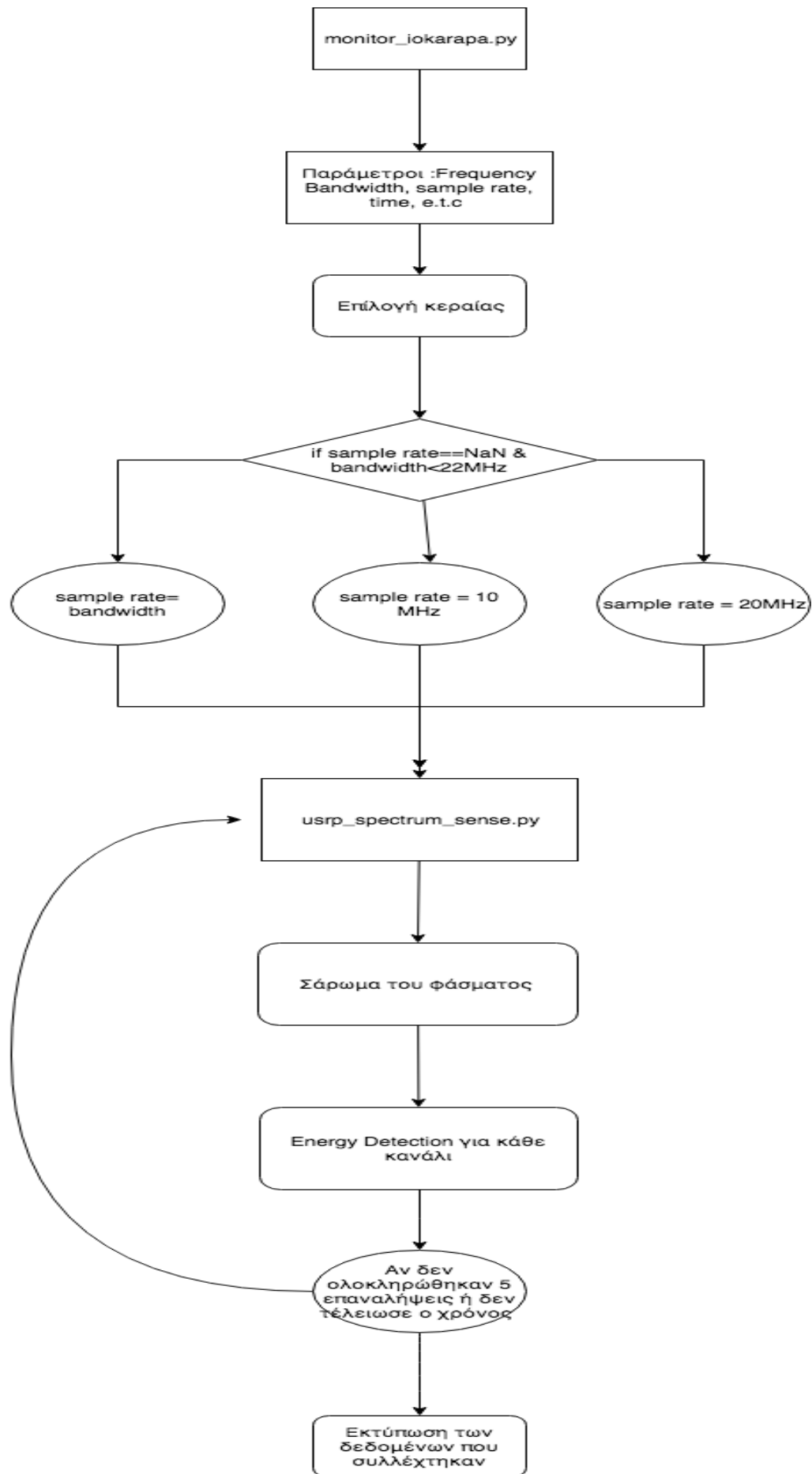
Εικόνα 2. 3. 1

Η κύρια δουλειά που κάνει το πρόγραμμα είναι η εξής, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που λαμβάνει η κεραία μετατρέπονται από την μορφή ροής δεδομένων σε ένα διάνυσμα, σε επόμενο στάδιο τα δεδομένα μεταφέρονται από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας με μετασχηματισμό τον Fast Fourier Transform (FFT). Τέλος το ποσό της ενέργειας υπολογίζεται μετατρέποντας την έξοδο του FFT σε λογαριθμική κλίμακα. Σε αυτό το σημείο πρέπει πούμε ότι το USRP δεν μπορεί να ανιχνεύσει με την μία ζώνες

συχνοτήτων μεγαλύτερες τον 56MHz. Για αυτό το πρόγραμμα εκτελεί μια διαδικασία πολλαπλών σταδίων χωρίζοντας το ζητούμενο φάσμα σε μικρότερα κομμάτια και εκτελώντας την ίδια διαδικασία για όλα. Διαπιστώνοντας έτσι ένα σημαντικό αρνητικό στοιχείο, δηλαδή οι μετρήσεις των φάσματος δεν ανταποκρίνονται σε στιγμιότυπο μιας χρονικής στιγμής αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, έχοντας την αμφιβολία ότι κάτι μπορεί να έχει αλλάξει και οι μετρήσεις να μην ανταποκρίνονται στην πραγματική εικόνα του φάσματος.

## 2.4) Νέα στοιχεία

Έχοντας στην διάθεση μας όλα τα εργαλεία και τις υπηρεσίες που μας προσφέρει το `usrp_spectrum_sense.py` ξεκινήσαμε να διαμορφώνουμε των κώδικα για να κατασκευάσουμε ορισμένες καινούργιες λειτουργίες που θα διαθέτει η πλατφόρμα, όπως και να βελτιώσουμε τις ήδη υπάρχουσες. Όπως προαναφέραμε το USRP έχει εξοπλιστεί με τέσσερις κεραίες που η κάθε μία καλύπτει ένα διαφορετικό μέρος του φάσματος, εκτός της προσφοράς σε μεγαλύτερο εύρος από το αρχικό, οι νέες κεραίες στα όρια λειτουργίας τους διαθέτουν μεγαλύτερο κέρδος και αποτυπώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα λαμβανόμενα σήματα. Έτσι ο χρήστη δίνοντας την αρχική και την τελική συχνότητα το πρόγραμμα ανακαλύπτει σε ποιο πεδίο εφαρμόζει καλύτερα και αναθέτει την κατάλληλη κεραία. Στα πλαίσια αυτής της επέκτασης του αρχικού κώδικα μπαίνει στο στόχαστρο των αλλαγών μας ο ρυθμός δειγματοληψίας (`sample_rate`) που έχει άμεση σύνδεση με το μέγεθος του καναλιού που εξετάζεται. Όπως είπαμε αυτό το μέγεθος δεν μπορεί να ξεπεράσει το 56 MHz, στην την αρχική υλοποίησή δίνεται η δυνατότητα επιλογής από την γραμμή εντολών και αν παραλειφθεί ορίζεται μια προκαθορισμένη τιμή (1MHz) μέγεθος που είναι μικρό για το εύρος συχνοτήτων που σκοπεύει να λειτουργεί η νέα υλοποίηση. Με την αύξηση του ρυθμού δειγματοληψίας (`sample_rate`) και το εύρος της εξεταζόμενης περιοχής σταθερό, το πρόγραμμα καθυστερεί να υπολογίσει τα αποτελέσματα αλλά το τελικό προϊόν περιέχει μεγαλύτερο ποσό πληροφορίας και διατυπώνει το φάσμα ακριβέστερα. Στην νέα υλοποίηση παραμένει ως έχει αυτή η δυνατότητα της άμεσης επιλογής αλλά σε περίπτωση απουσίας της ορίζεται ανάλογα με το μέγεθος της εξεταζόμενης περιοχής. Τέλος ένα καινούργιο στοιχείο που έχει προστεθεί στον καινούργιο κώδικα είναι ο συντελεστής του χρόνου, ο χρήστης μπορεί να αποφασίσει τον χρόνο για τον οποίο θα λειτουργεί το πρόγραμμα αν δεν οριστεί κάποια τιμή, το πρόγραμμα εκτελεί πέντε επαναλήψεις για να δώσει μεγαλύτερη εγκυρότητα στα αποτελέσματα. Τέλος όπως και με την μεταβλητή του ρυθμού δειγματοληψίας έτσι και με τον αριθμό των επαναλήψεων και τον χρόνο λειτουργίας που το πρόγραμμα θα λειτουργεί, επιφέρει μια αντίστροφη σχέση μεταξύ ταχύτητας και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής φαίνονται συνοπτικά τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος της πλατφόρμας μας.



## 3) Πειράματα

### 3.1) Τοπολογία

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να μιλήσουμε για το μέρος που έλαβε τόπο, η ανάπτυξη της πλατφόρμας, οι δοκιμές για να διαπιστώσουμε αν δουλεύει έτσι όπως το σχεδιάσαμε αλλά και τα πειράματα που τρέξαμε. Τα οποία στην συνέχεια θα σχολιάσουμε για να γίνει κατανοητό πως επηρεάζονται τα αποτελέσματα από την αλλαγή των παραμέτρων. Όλα αυτά τα στάδια πραγματοποιήθηκαν στον testbed του NITOS συγκεκριμένα είναι μια υποδομή που αποτελείται από ισχυρούς ασύρματους κόμβους, διαθέτουν πολλαπλές ασύρματες διεπαφές που επιτρέπουν των πειραματισμό σε τεχνολογίες όπως (Wi-Fi, WiMAX, LTE). Ο testbed του πανεπιστημίου διαχωρίζεται σε δυο κομμάτια, το ένα αποτελείται από 40 κόμβους και έχει εγκατασταθεί σε εξωτερικό περιβάλλον του κτηρίου του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.



Εικόνα 3. 1. 1

Το δεύτερο μέρος του testbed διαθέτει 50 κόμβους Icarus στον εσωτερικό χώρο του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δημιουργώντας έτσι ένα περιβάλλον απομονωμένο από ανεπιθύμητες εκπομπές.

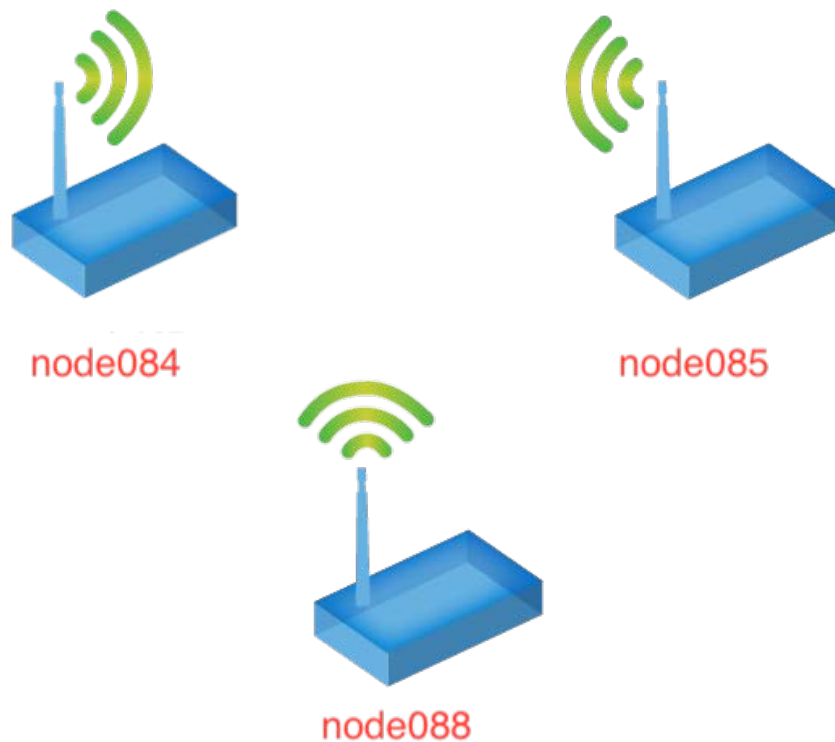


Εικόνα 3. 1. 2

Για την δημιουργία της πλατφόρμας μας δεσμεύσαμε αποκλειστικά τον κόμβο 088 τον οποίο τον εξοπλίσαμε με τις κατάλληλες κεραίες όπως αναφέραμε και παραπάνω. Αφού έγιναν αλλαγές και επεκτάσεις πάνω στον κώδικα `usrp_spectrum_sense.py` που μας προσφέρει το GNU radio. Ξεκίνησαν τα πειράματα που δίνουν μια ολοκληρωμένη εικόνα των δυνατοτήτων της πλατφόρμας μας. Συγκεκριμένα δημιουργήσαμε τρία σενάρια για διαφορετικές τεχνολογίες που καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος του φάσματος.

### 3.2) Wi-Fi

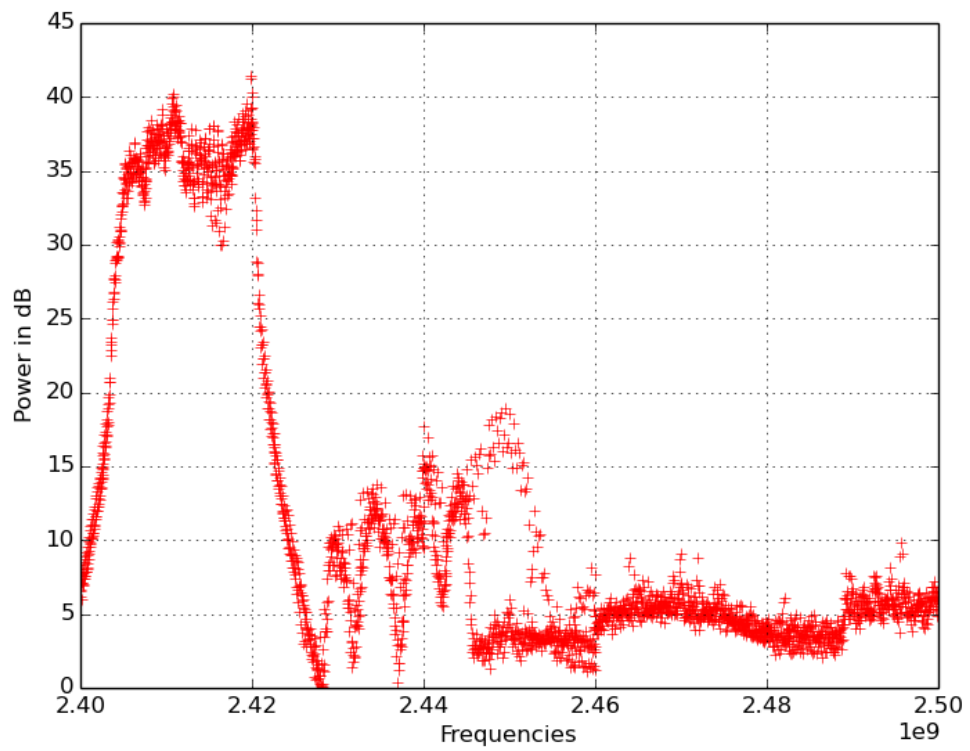
Στο πρώτο σενάριο δημιουργήσαμε μία μετάδοση Wi-Fi στα 2,4 GHz μεταξύ των κόμβων 084 και 085, χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά κανάλια, το 1<sup>ο</sup> που είναι στο αριστερό άκρο της ελεγχόμενης περιοχής, το 6<sup>ο</sup> κανάλι που είναι ακριβώς στη μέση και τέλος τον 11<sup>ο</sup> κανάλι που είναι στο τέρμα δεξιά άκρο. Σε αυτό το σημείο στον κόμβο 088 ξεκινήσαμε να λειτουργούμε τον αλγόριθμο μας (`monitor_iskagara.py`) με έξι διαφορετικά σύνολα παραμέτρων,



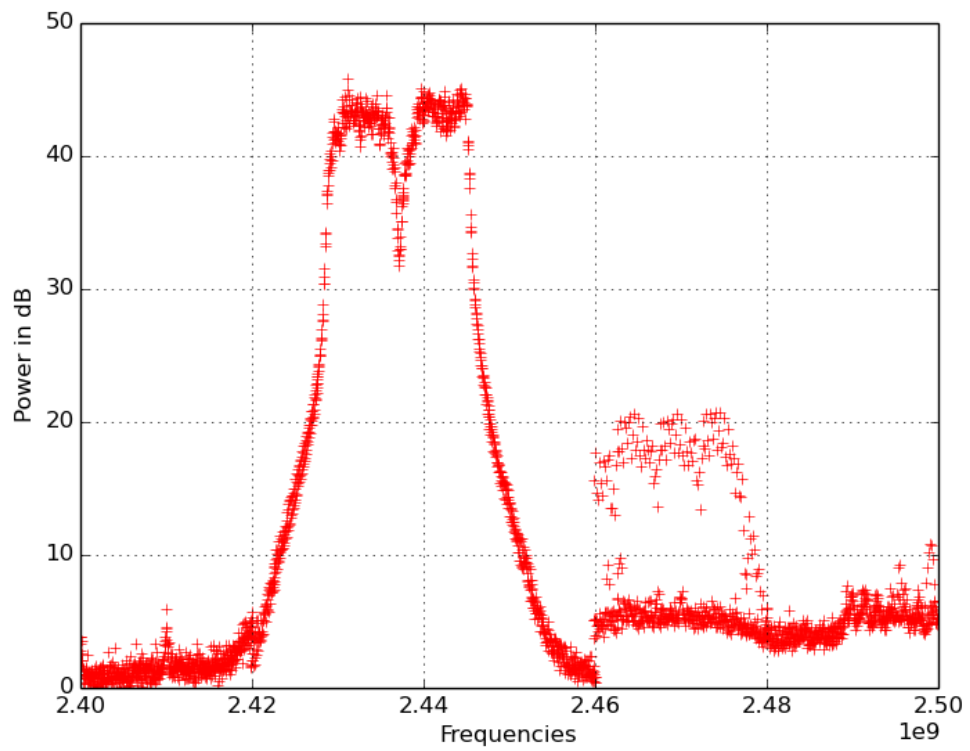
Εικόνα 3. 2. 1

σκοπός μας είναι να παρατηρήσουμε πως διαφοροποιούνται τα τελικά αποτελέσματα ανάλογα τις επιλογές αυτές. Αρχικά ζητήσαμε από το πρόγραμμα να παρακολουθήσει το φάσμα συχνοτήτων μεταξύ των 2,4 GHz και 2,5 GHz, και στις έξι περιπτώσεις η τιμή του sample rate ήταν 20 MHz, στις τρεις από τις έξι ορίσαμε το FFT SIZE στα 128 bins και στις υπόλοιπες 1024 bins. Τέλος μία ακόμα παράμετρο που ρυθμίσαμε ήταν ο χρόνος, πρώτα δεν δόθηκε κάποιο συγκεκριμένο μέγεθος και το πρόγραμμα έτρεξε για 12s τόσο χρειάζεται για να ολοκληρώσει τον προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Έπειτα επιλέξαμε χρόνο λειτουργίας να είναι στα 2,4 s και 14 s. Γενικά η διαδικασία που ακολουθείτε στα επόμενα παραδείγματα είναι η εξής, το αρχικό ζητούμενο εύρος χωρίζεται ανάλογα το sample rate, για παράδειγμα τα ζητούμενα 100MHz για ανάλυση χωρίζονται σε 5 μέρη. Το κάθε ένα διαχωρίζεται με την σειρά του σε μικρότερα κομμάτια όσα είναι και τα bins του FFT SIZE. Ο αλγόριθμος σαρώνει όλα αυτά τα κομμάτια με την σειρά και όταν ολοκληρώσει 5 κύκλους τερματίζει. Στην περίπτωση που δοθεί η παράμετρος του χρόνου η παραπάνω διαδικασία λειτουργεί για αυτόν τον χρόνο.

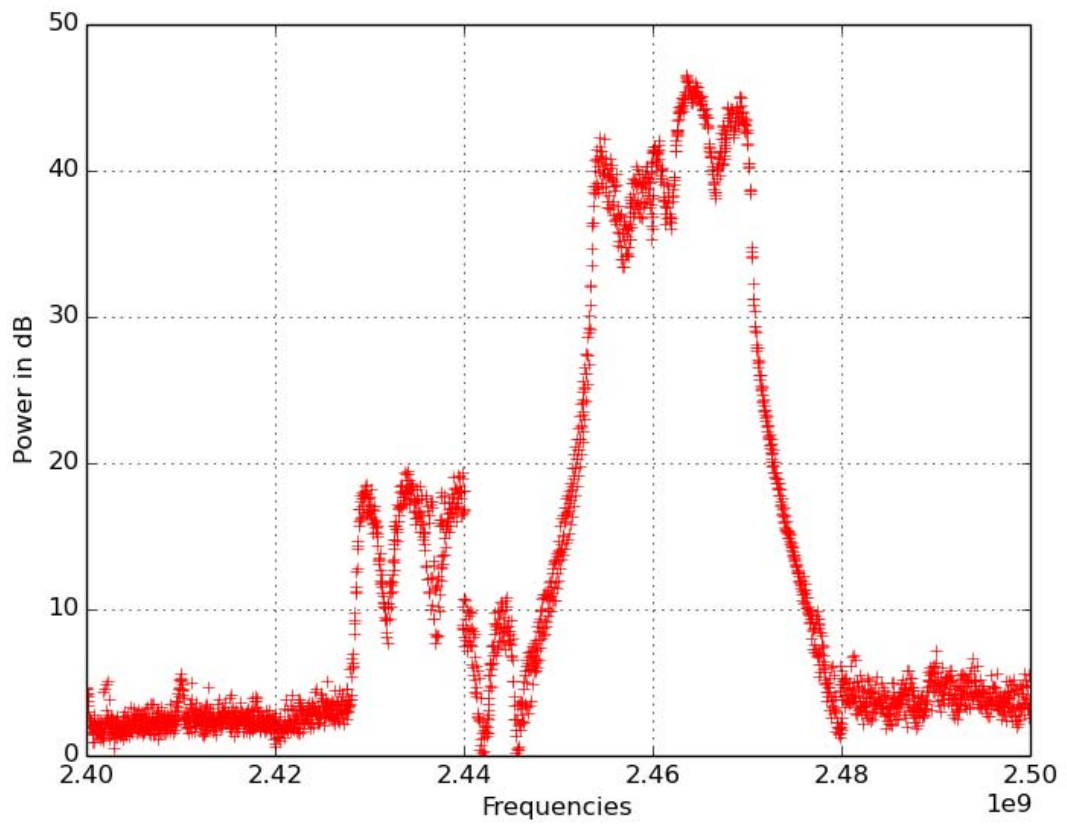
- Monitor: 2.4 GHz-2.5 GHz, Sample Rate 20 MHz, FFT Size 128



Εικόνα 3. 2. 2



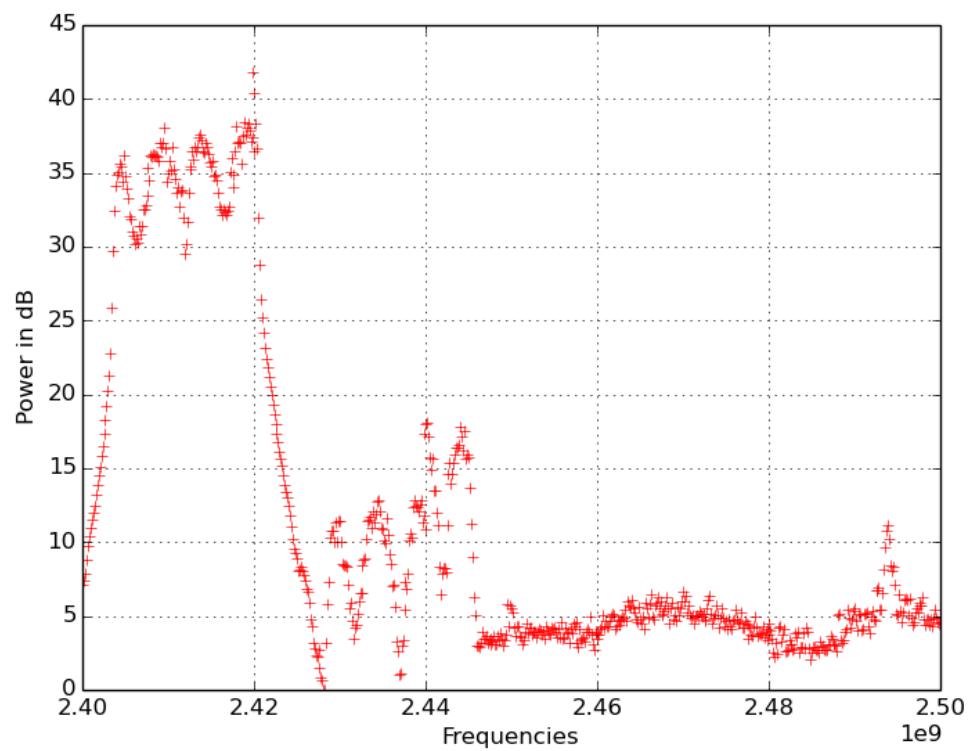
Εικόνα 3. 2. 3



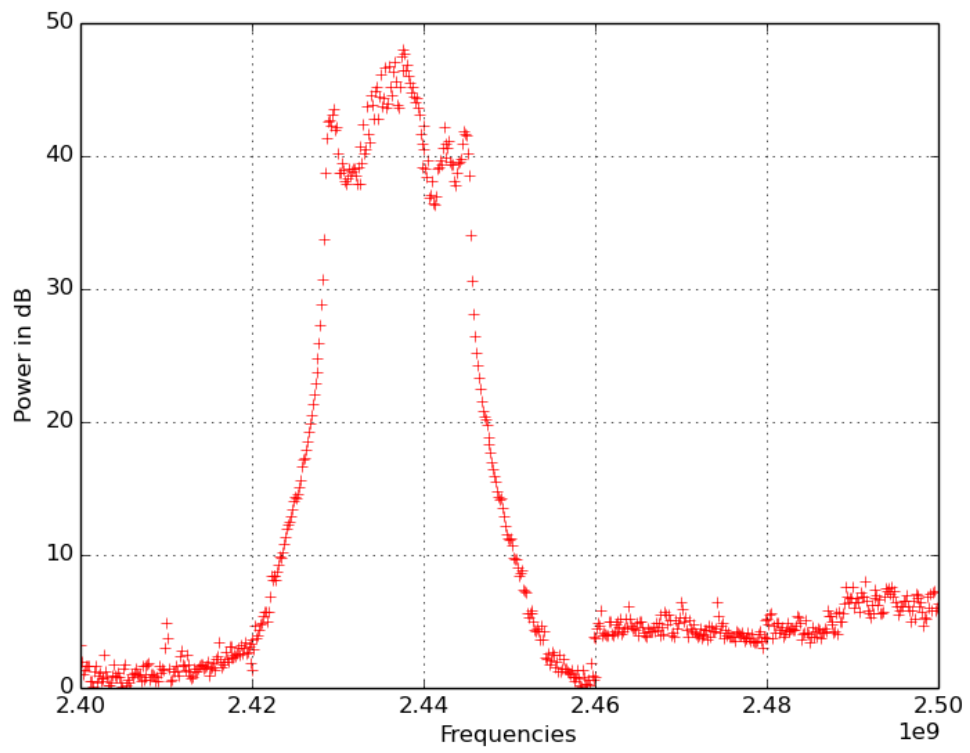
Εικόνα 3. 2. 4



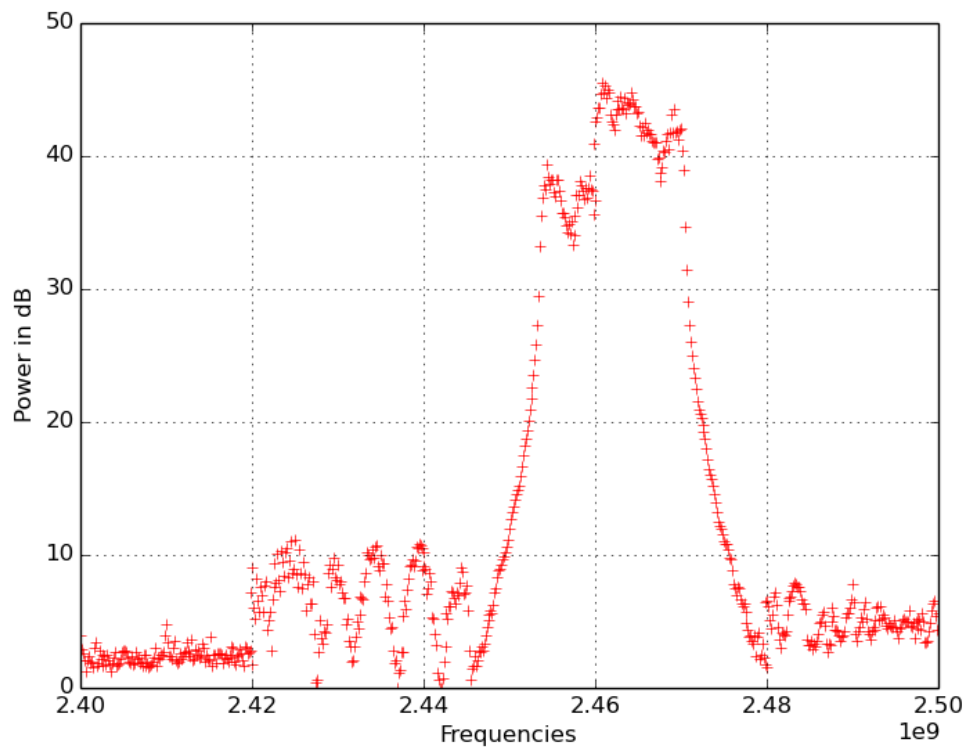
- Monitor: 2.4 GHz-2.5 GHz, Sample Rate 20 MHz ,FFT Size 128, Time 2.6 s



Εικόνα 3. 2. 5

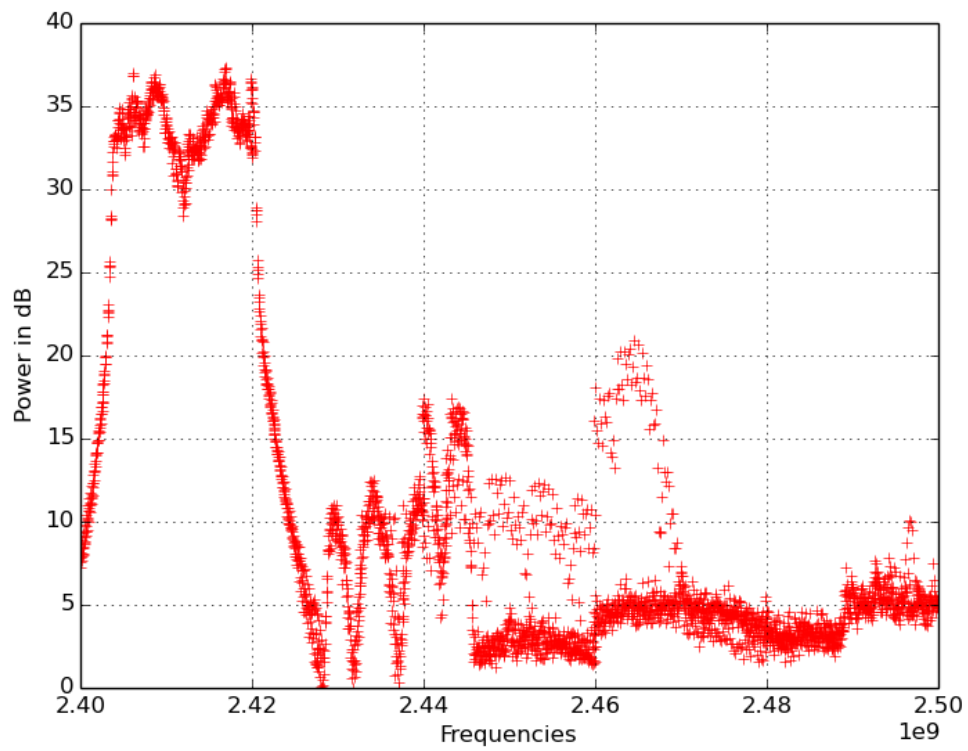


Εικόνα 3. 2. 6

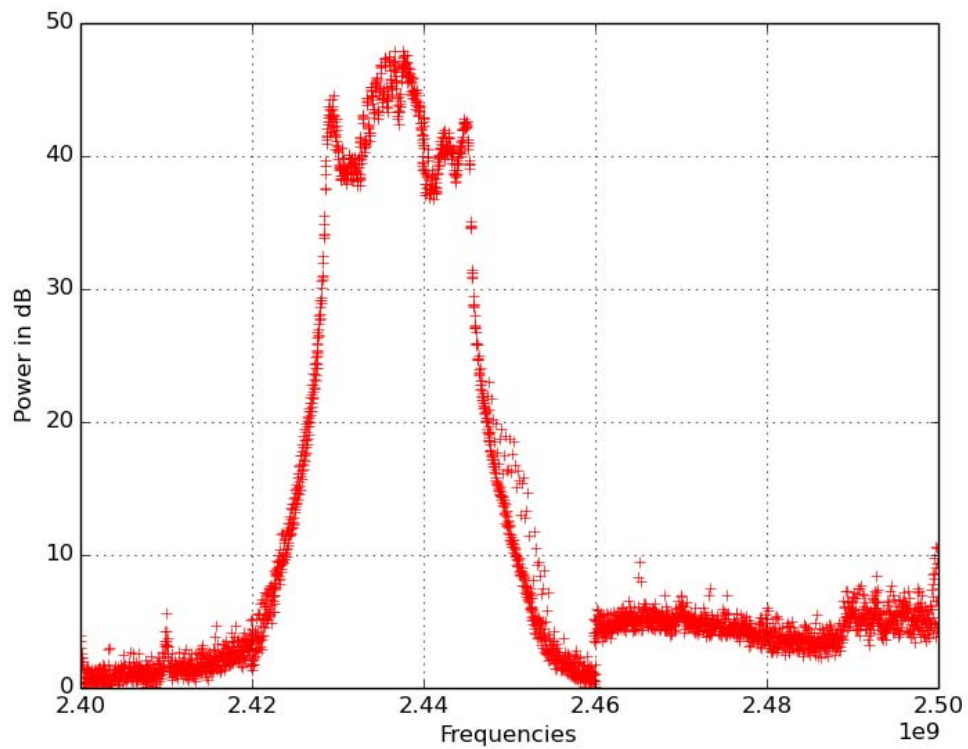


Εικόνα 3. 2. 7

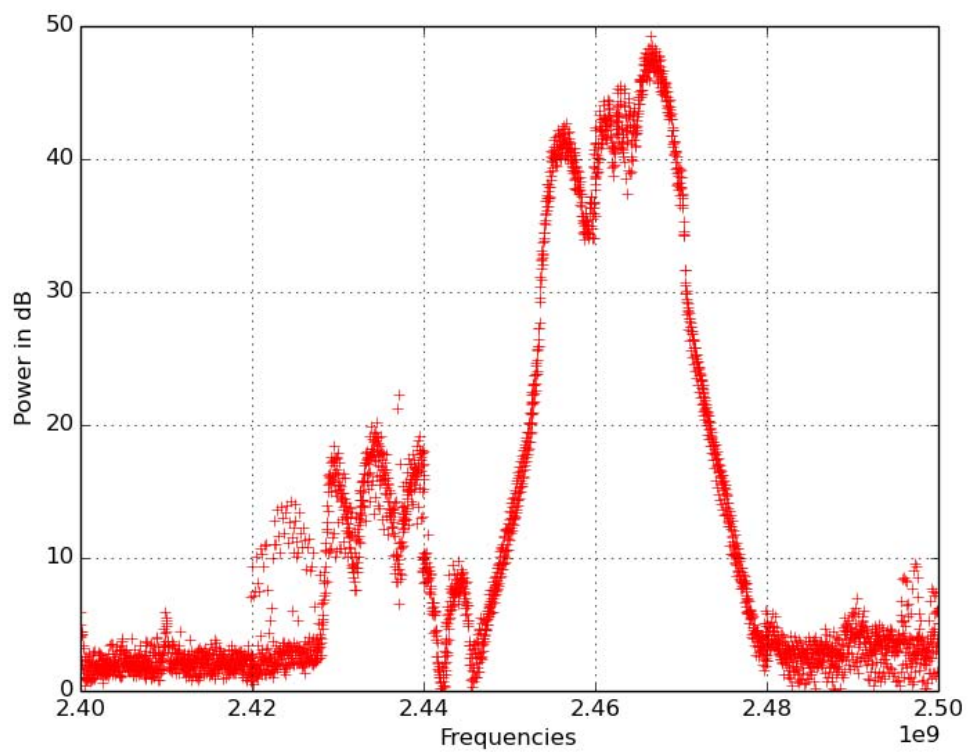
- Monitor: 2.4GHz-2.5GHz, Sample Rate 20MHz ,FFT Size 128, Time 14 s



Εικόνα 3. 2. 8

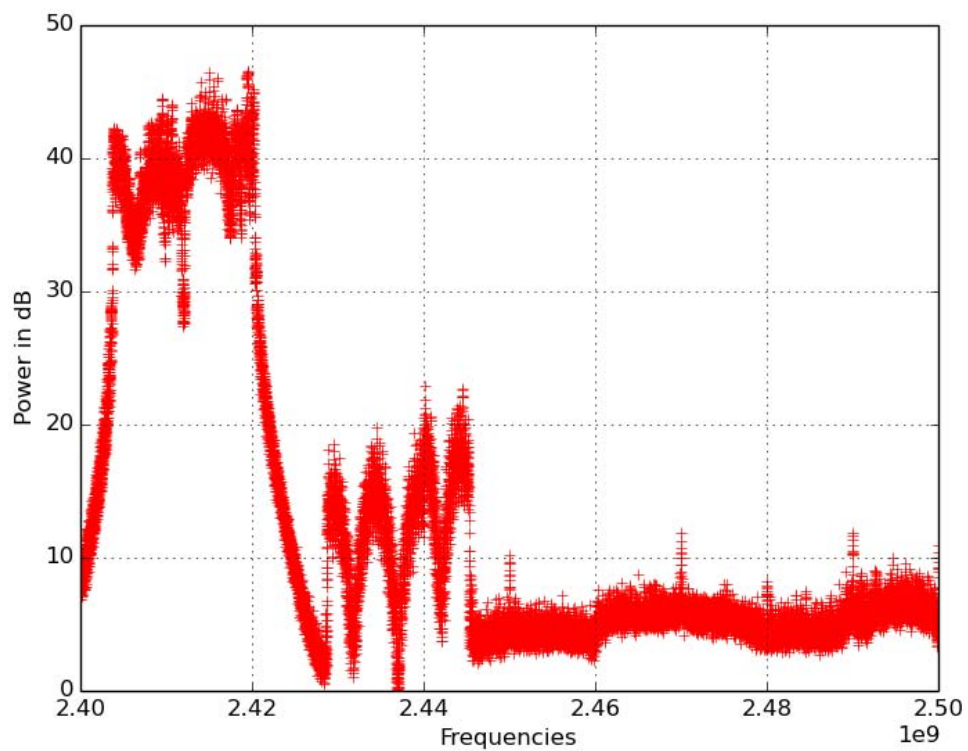


Εικόνα 3. 2. 9

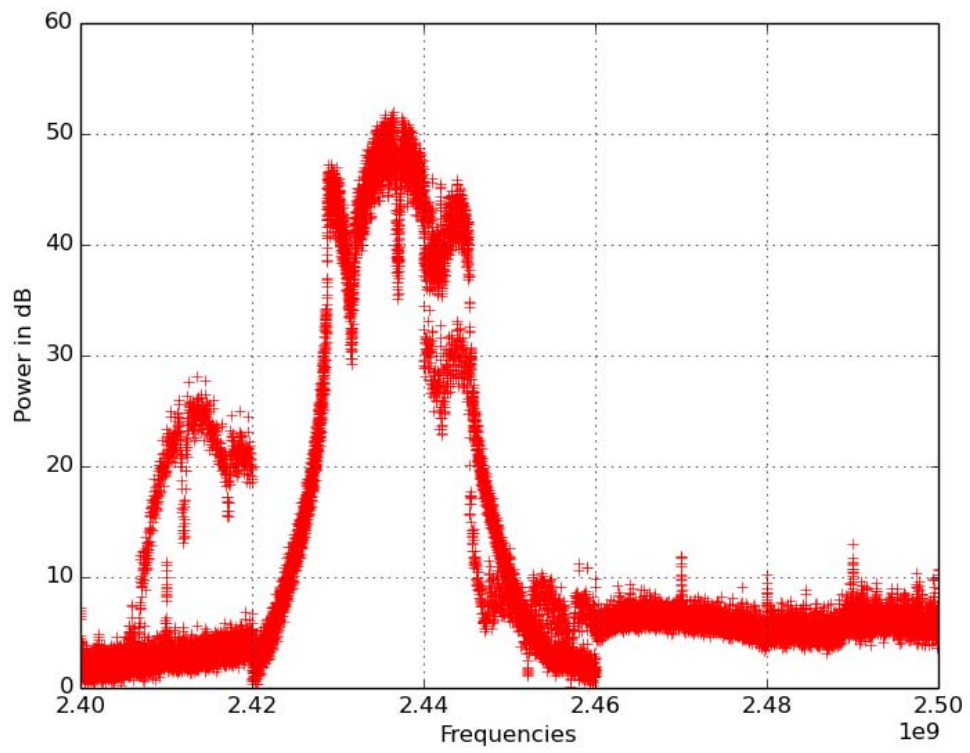


Εικόνα 3. 2. 10

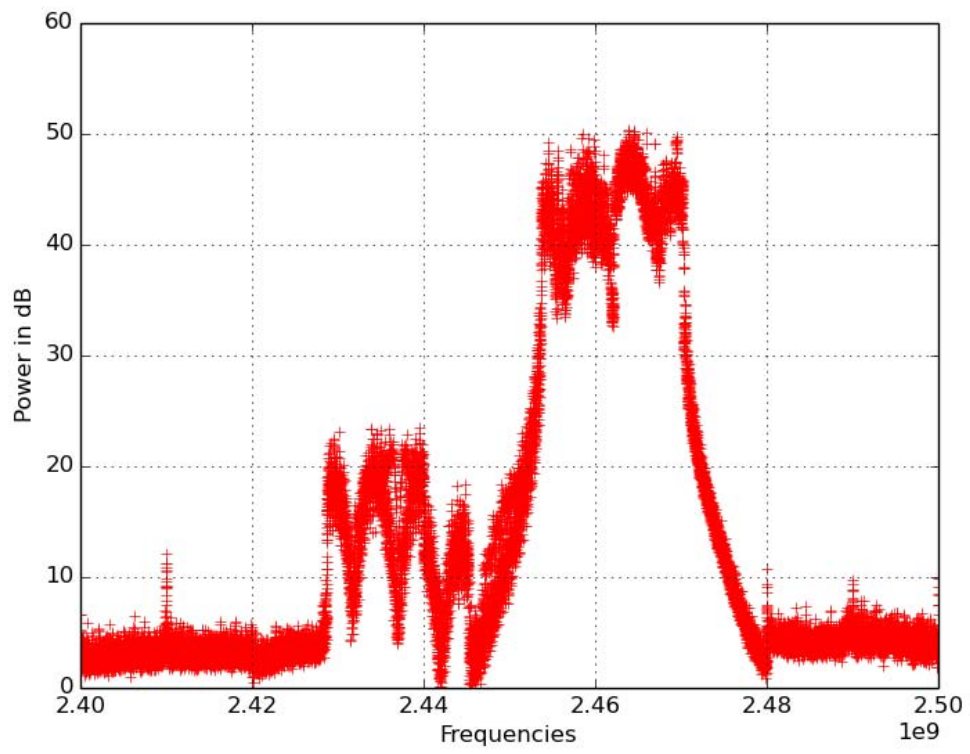
- Monitor: 2.4GHz-2.5GHz, Sample Rate 20MHz, FFT Size 1024



Εικόνα 3. 2. 11

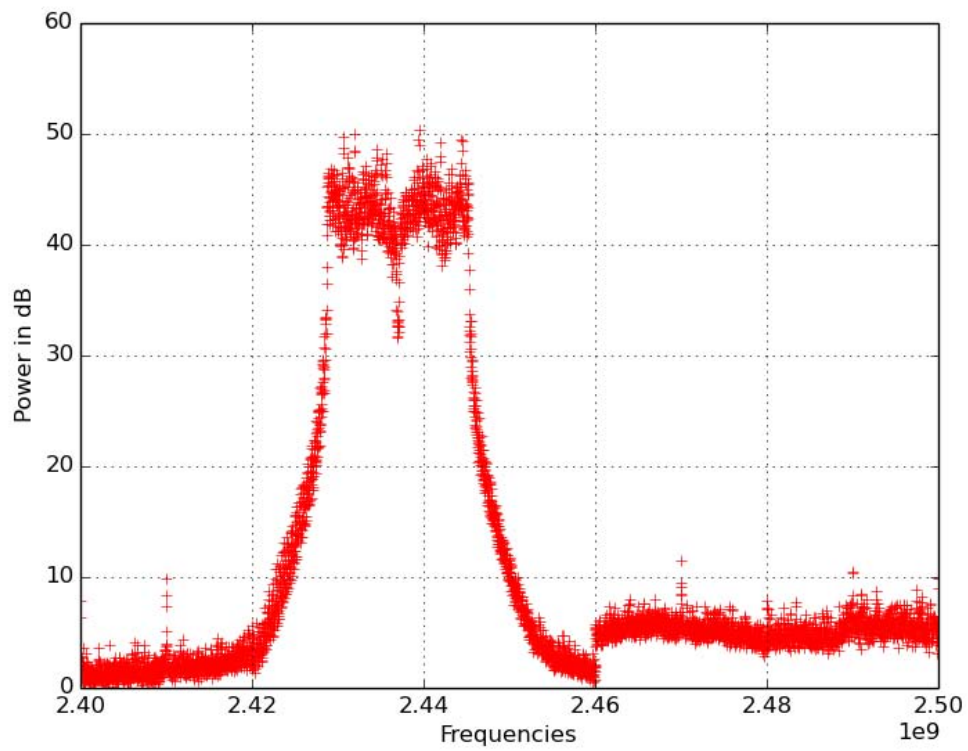


Εικόνα 3. 2. 12

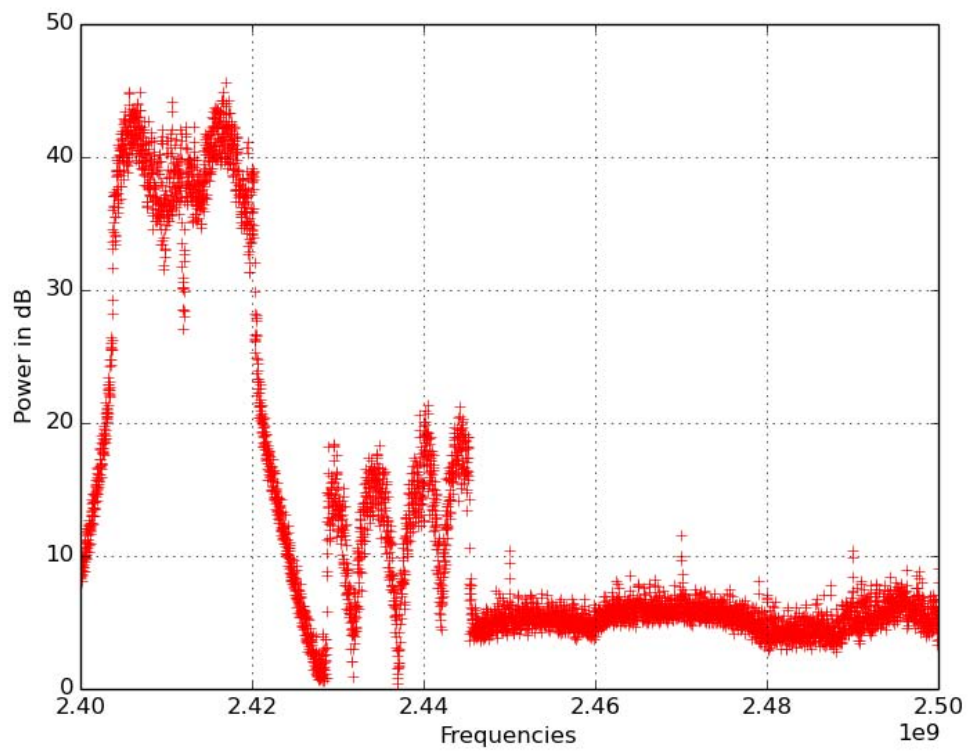


Εικόνα 3. 2. 13

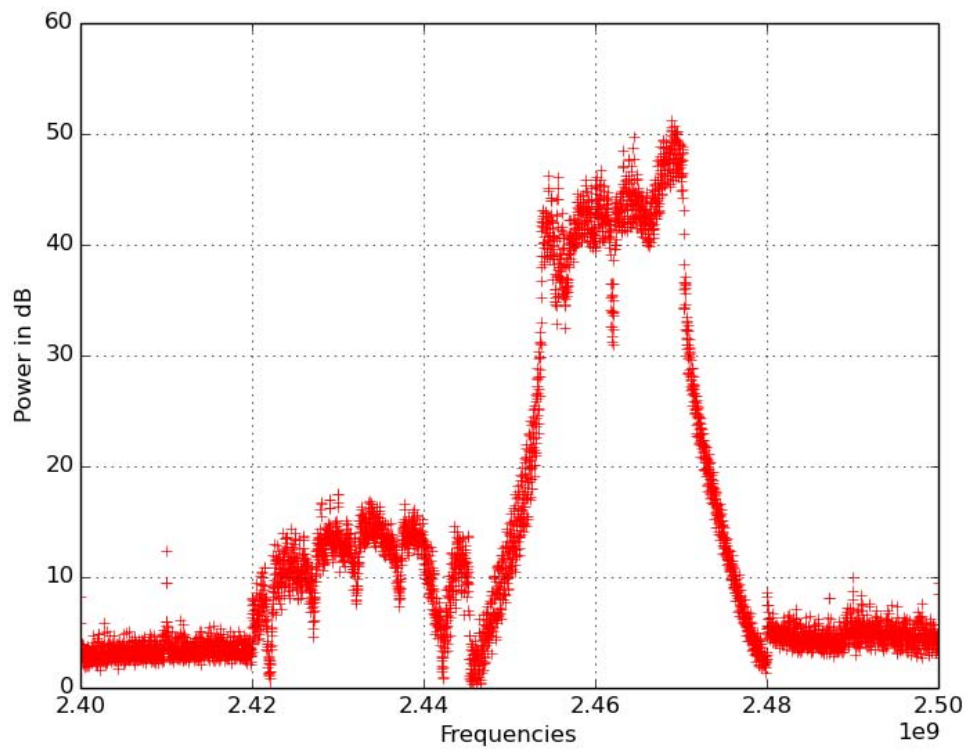
- Monitor: 2.4GHz-2.5GHz, Sample Rate 20MHz, FFT Size 1024, Time 2.6s



Εικόνα 3. 2. 14

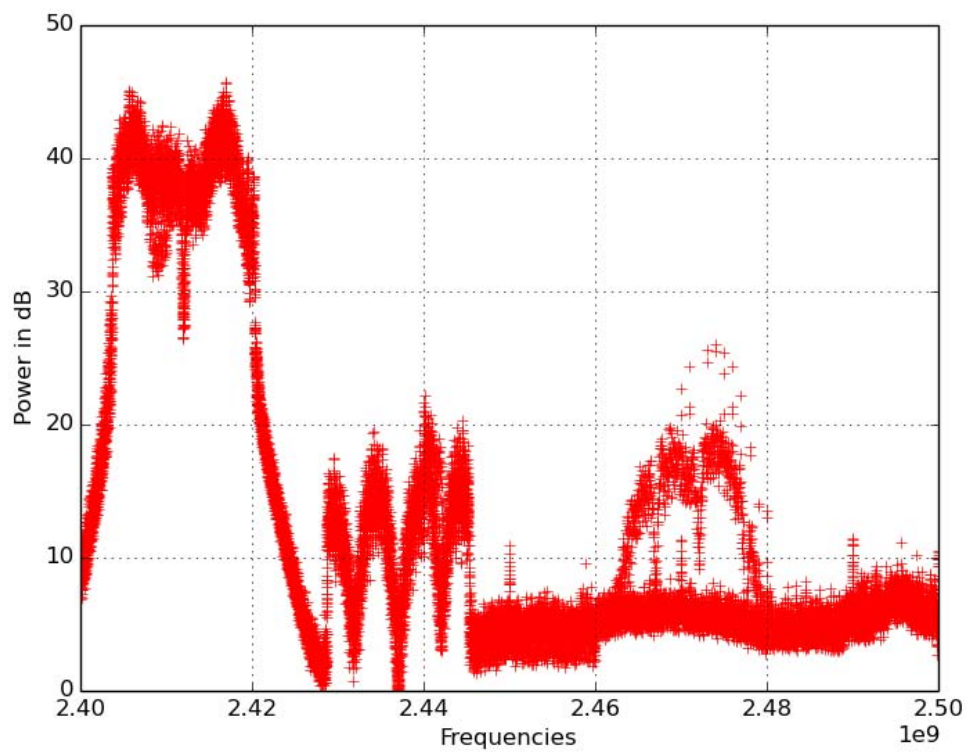


Εικόνα 3. 2. 15

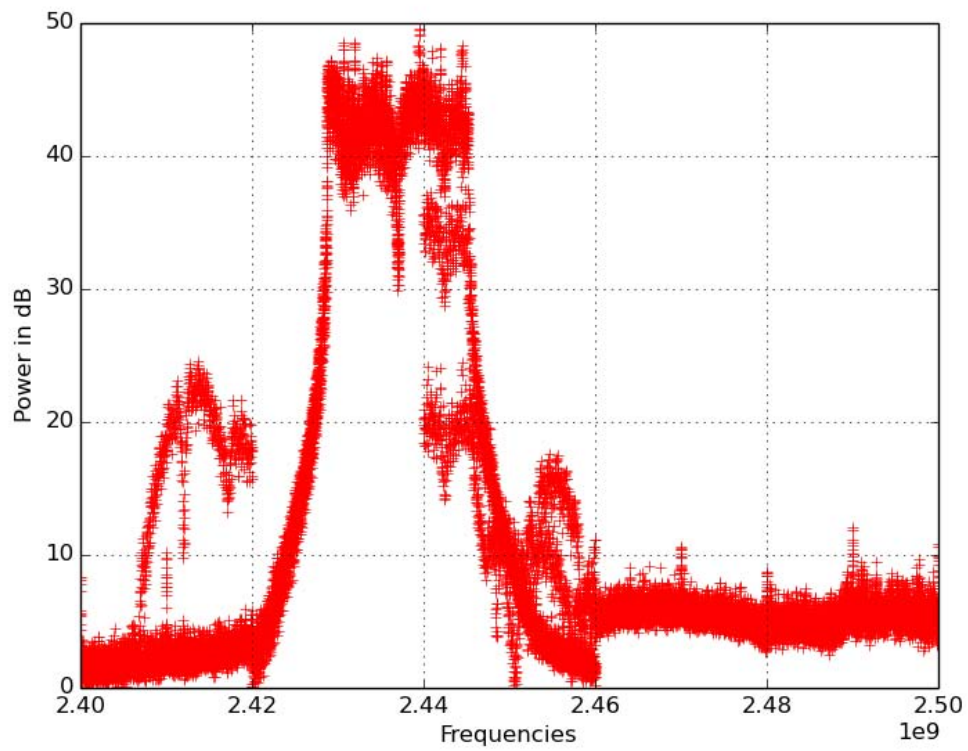


Εικόνα 3. 2. 16

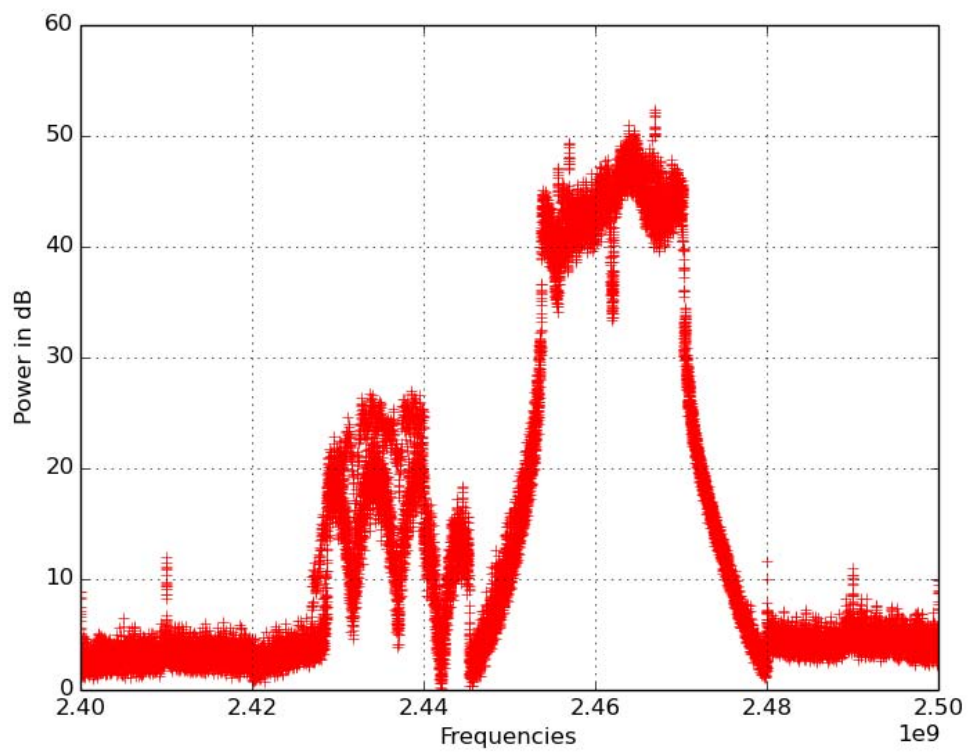
- Monitor: 2.4GHz-2.5GHz, Sample Rate 20MHz, FFT Size 1024, Time 14 s



Εικόνα 3. 2. 17



Εικόνα 3. 2. 18



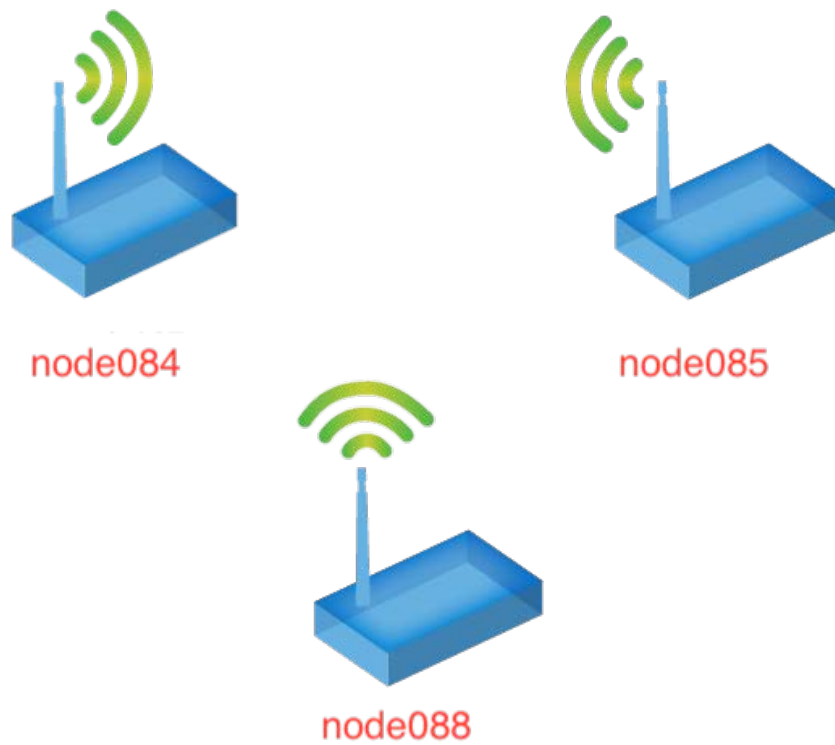
Εικόνα 3. 2. 19



Συγκρίνοντας τα διαγράμματα με γνώμονα τις παραμέτρους που δίνουμε στο monitor πρέπει να καταλάβουμε ότι με την αύξηση του μεγέθους FFT Size αλλά και του χρόνου, παίρνουμε μεγαλύτερο πόσο πληροφορίας αλλά και μεγαλύτερο ρίσκο στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια των πειραμάτων υπήρχαν ανεπιθύμητες μεταδόσεις, τις οποίες δεν μπορέσαμε να ελέγξουμε, για αυτό σε πολλές περιπτώσεις εκτός από τον κύριο λοβό στο εκάστοτε κανάλι υπάρχει και μια ακόμα μετάδοση στα υπόλοιπα κανάλια και πιο συγκεκριμένα στο κανάλι 6.

### 3.3) Narrowband

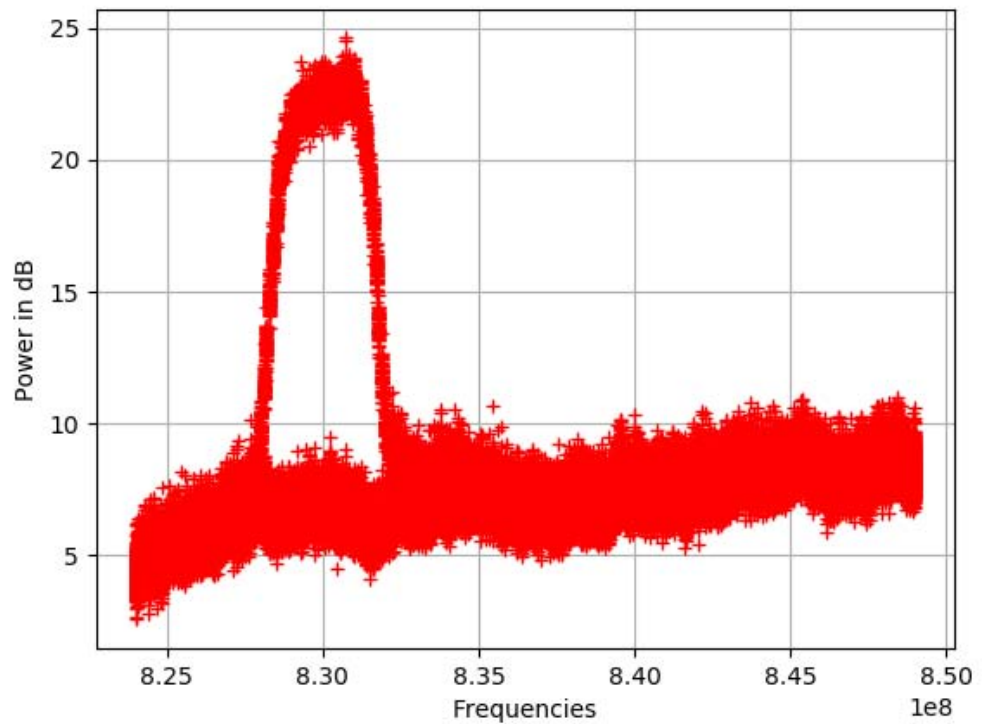
Μια άλλη δοκιμή που θα κάνουμε για να δείξουμε όλο το φάσμα λειτουργίας του αλγορίθμου μας, είναι η εκπομπή narrowband σε συχνότητες μεταξύ 824MHz και 849MHz στον κόμβο 084 στήνουμε μια μετάδοση προς τον κόμβο 085 με την χρήση του benchmark\_tx.py. Τα μήκη των εκπομπών θα κυμαίνονται στα 3MHz, 2 MHz, 1.5 MHz, 1MHz και 0.5 MHz και κεντρική συχνότητα στα 830MHz. Στην συνέχεια πάλι στον κόμβο 088 θα δραστηριοποιηθεί ο αλγόριθμος που κατασκευάσαμε με την μεταβλητή του sample rate στα 25 MHz, 5MHz και 1 MHz.



Εικόνα 3. 3. 1

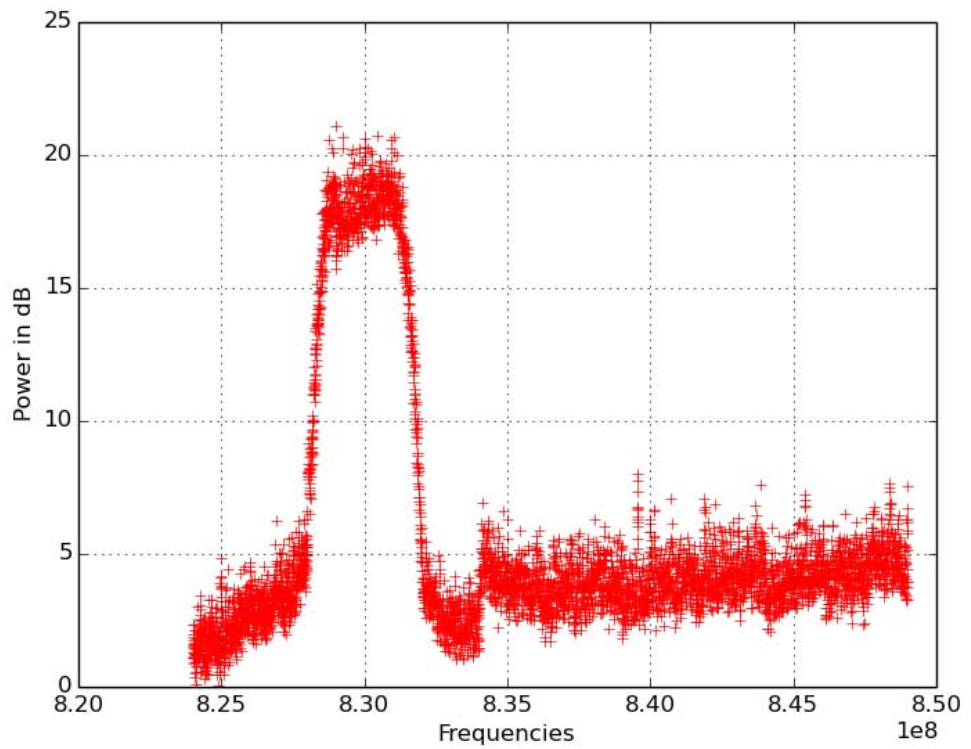
Μετάδοση στην συχνότητα 830MHz με πλάτος (Bandwidth) 3MHz.

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 25MHz, FFT Size 256 bins.



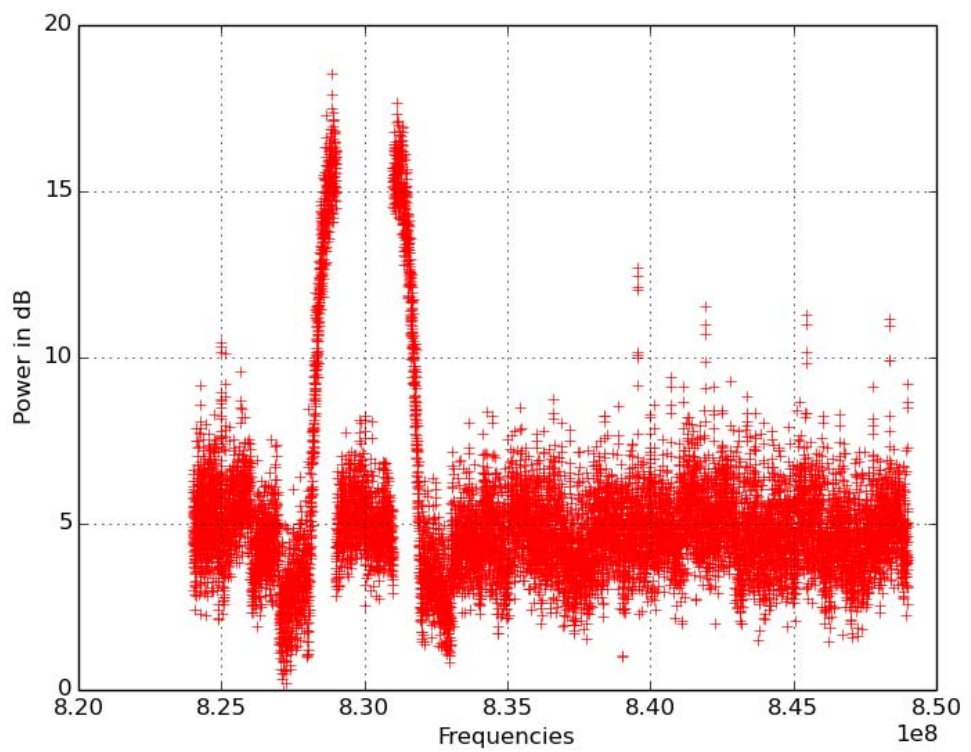
Εικόνα 3. 3. 2

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 5MHz, FFT Size 256 bins



Εικόνα 3. 3. 3

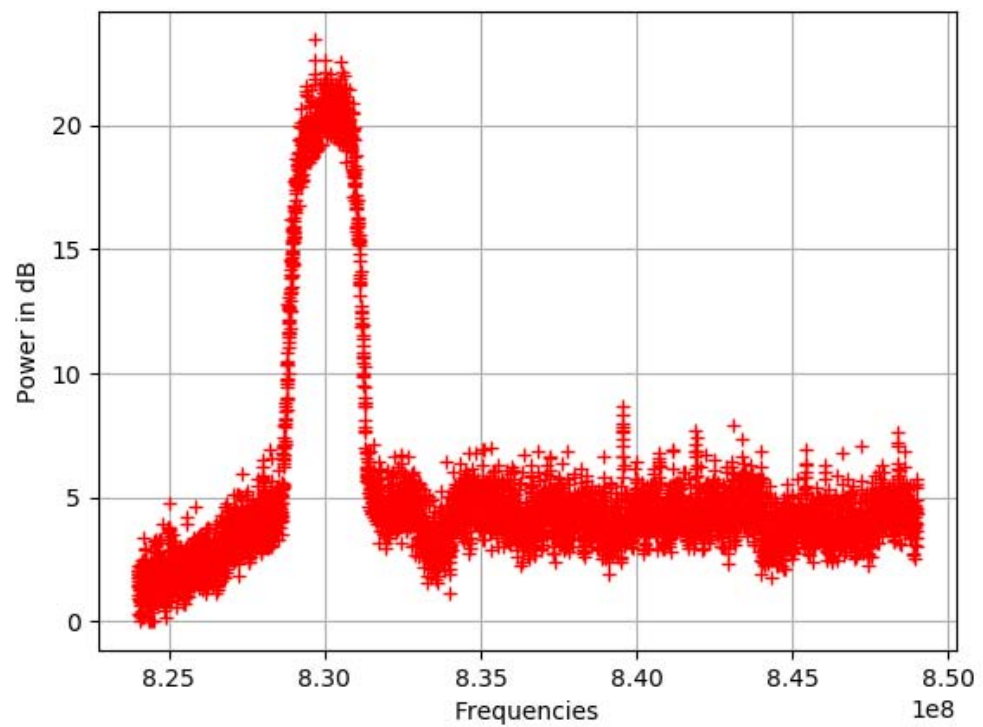
- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 1MHz, FFT Size 256 bins.



Εικόνα 3. 3. 4

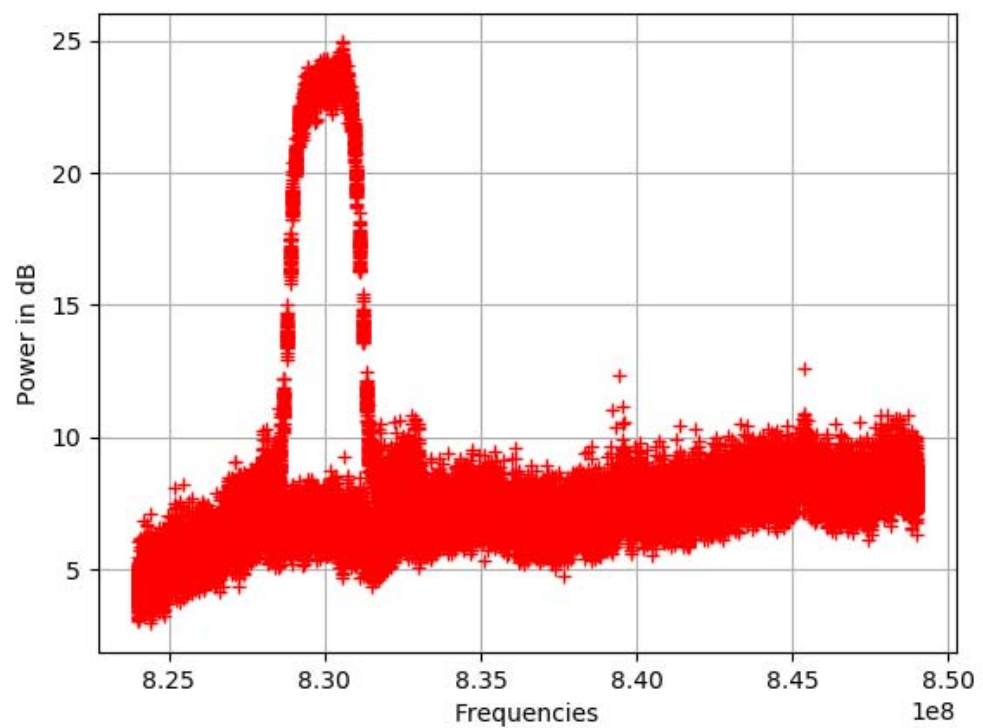
Μετάδοση στην συχνότητα 830MHz με πλάτος (Bandwidth) 2MHz.

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 25MHz, FFT Size 256 bins.



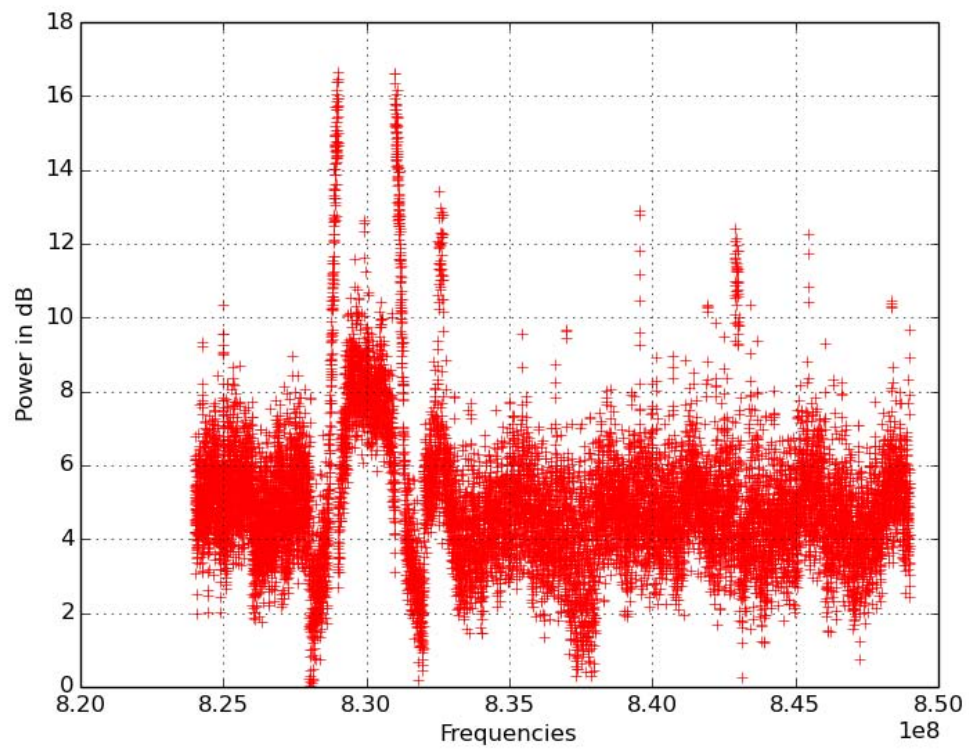
Εικόνα 3. 3. 5

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 5MHz, FFT Size 256 bins.



Εικόνα 3. 3. 6

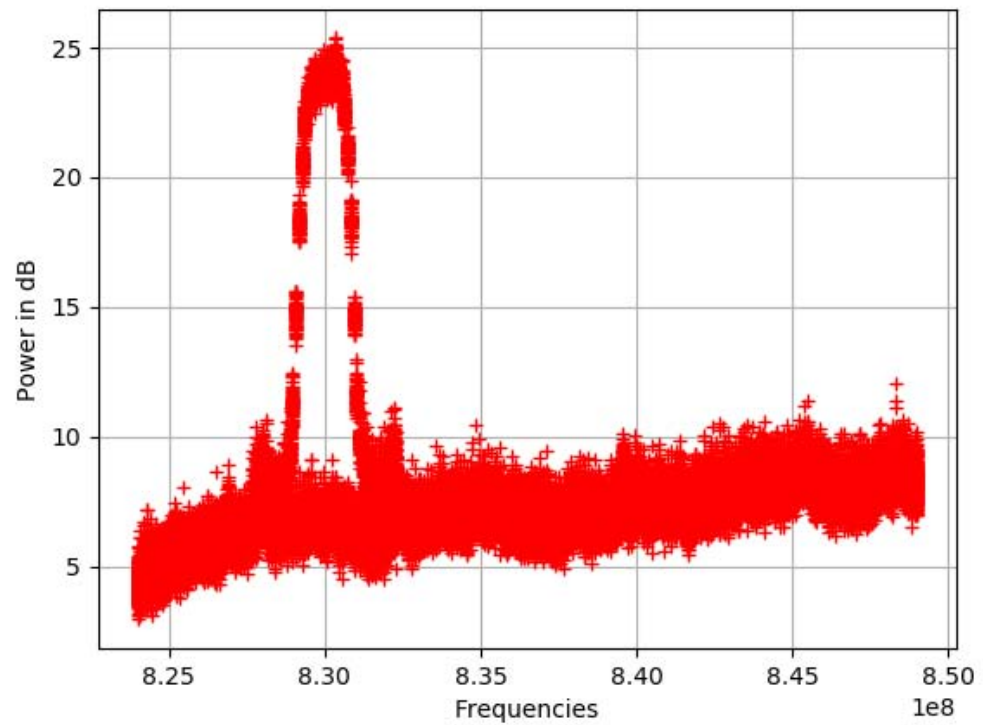
- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 1MHz, FFT Size 256 bins.



Εικόνα 3. 3. 7

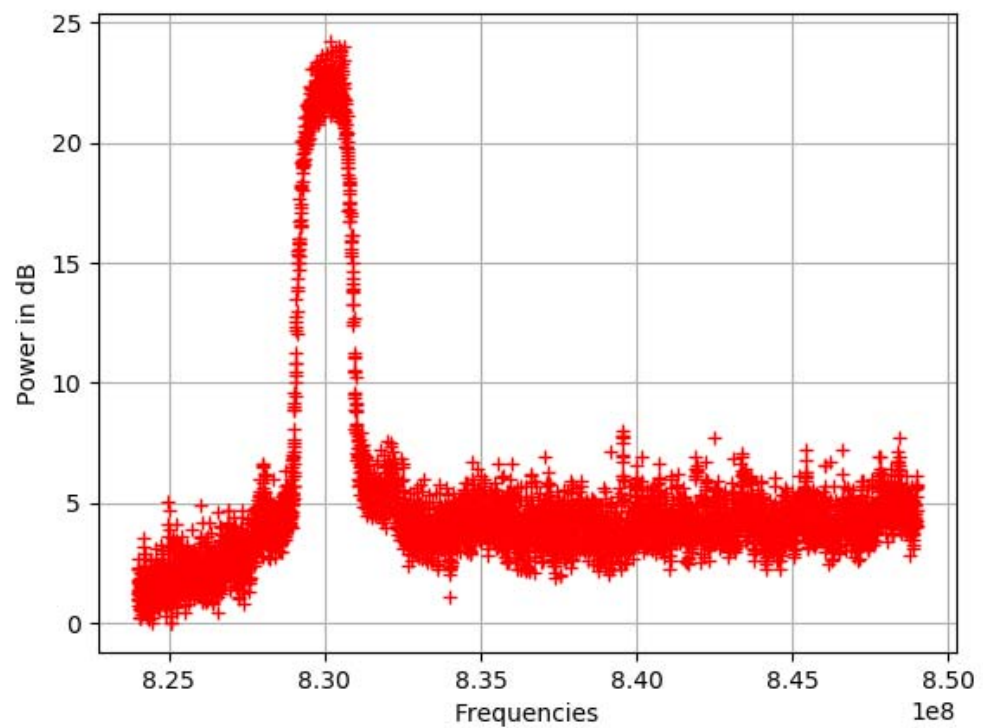
Μετάδοση στην συχνότητα 830MHz με πλάτος (Bandwidth) 1.5MHz.

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 25MHz, FFT Size 256 bins.



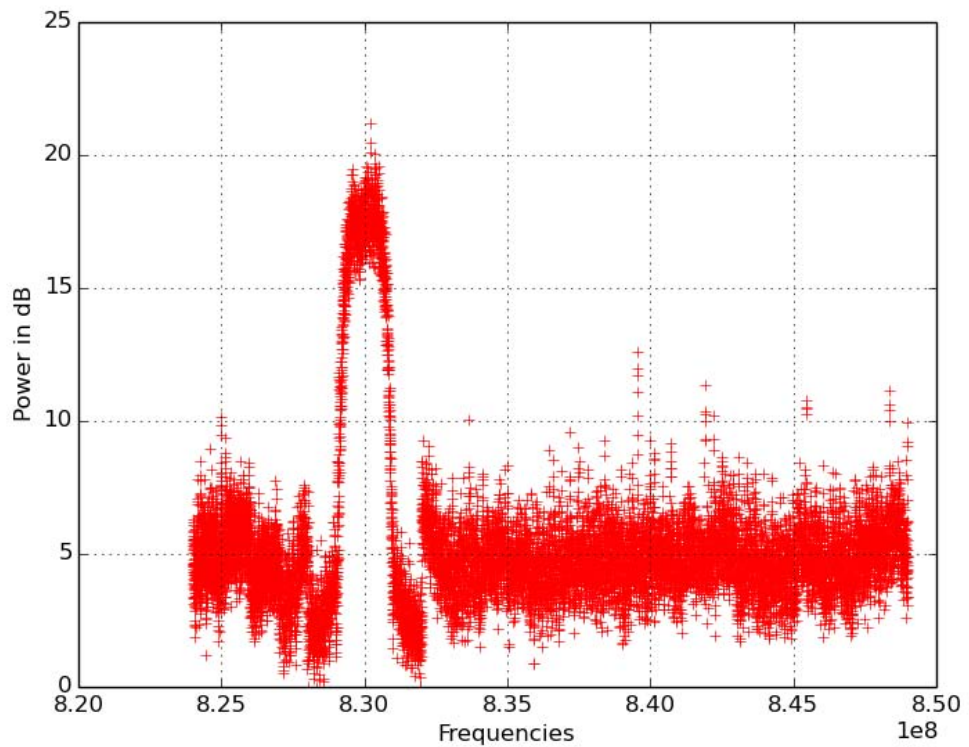
Εικόνα 3. 3. 8

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 5MHz, FFT Size 256 bins.



Εικόνα 3. 3. 9

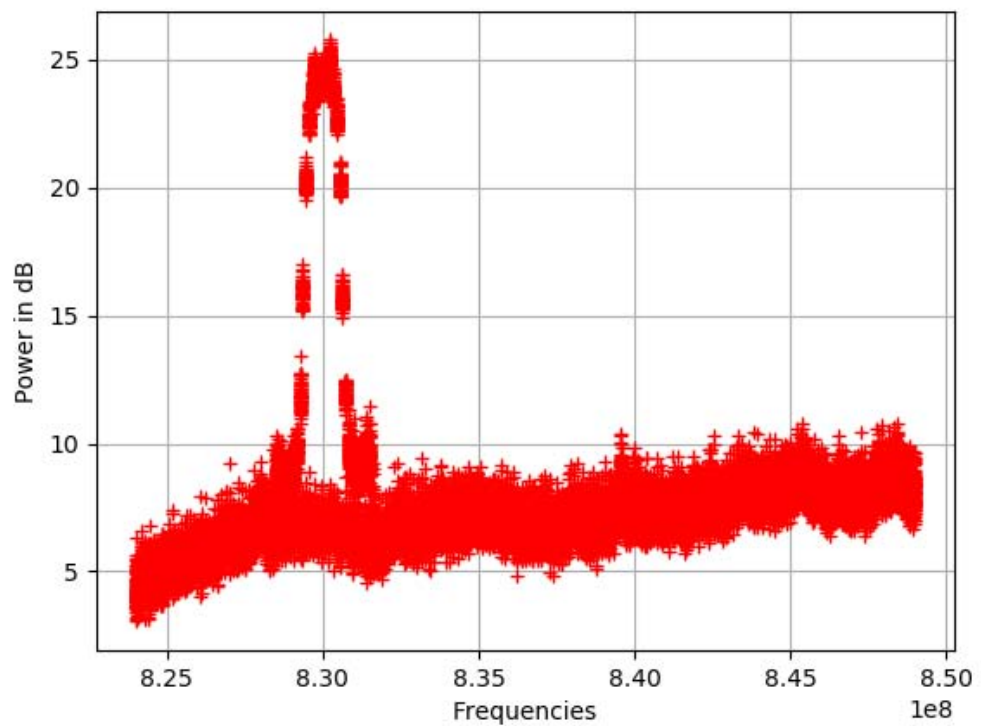
- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 1MHz, FFT Size 256 bins.



Εικόνα 3. 3. 10

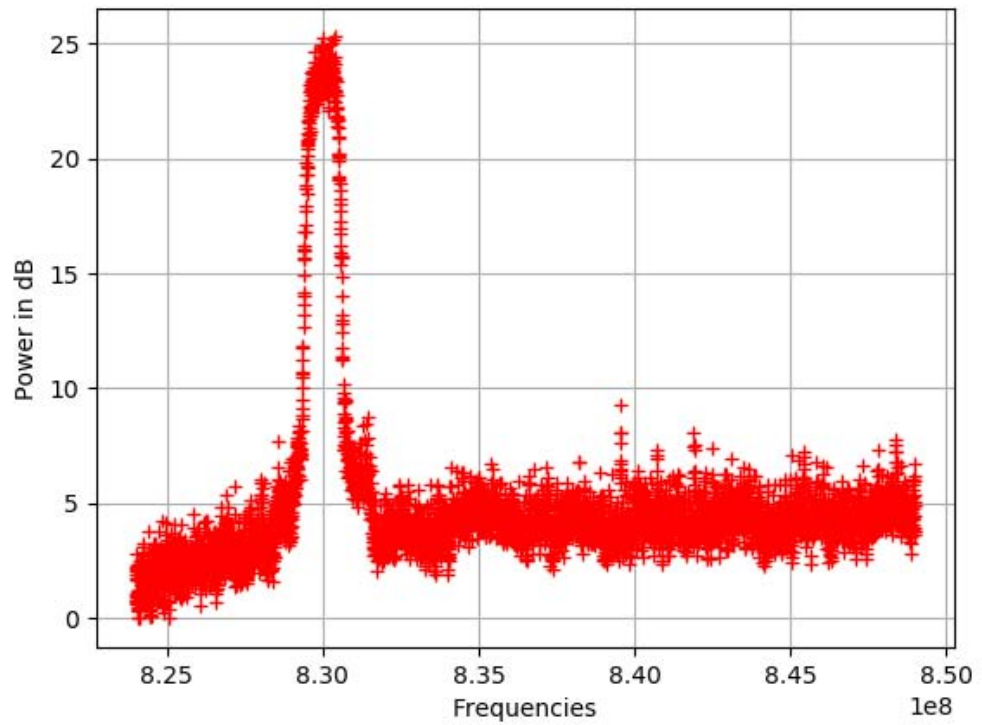
Μετάδοση στην συχνότητα 830MHz με πλάτος (Bandwidth) 1MHz.

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 25MHz, FFT Size 256 bins.



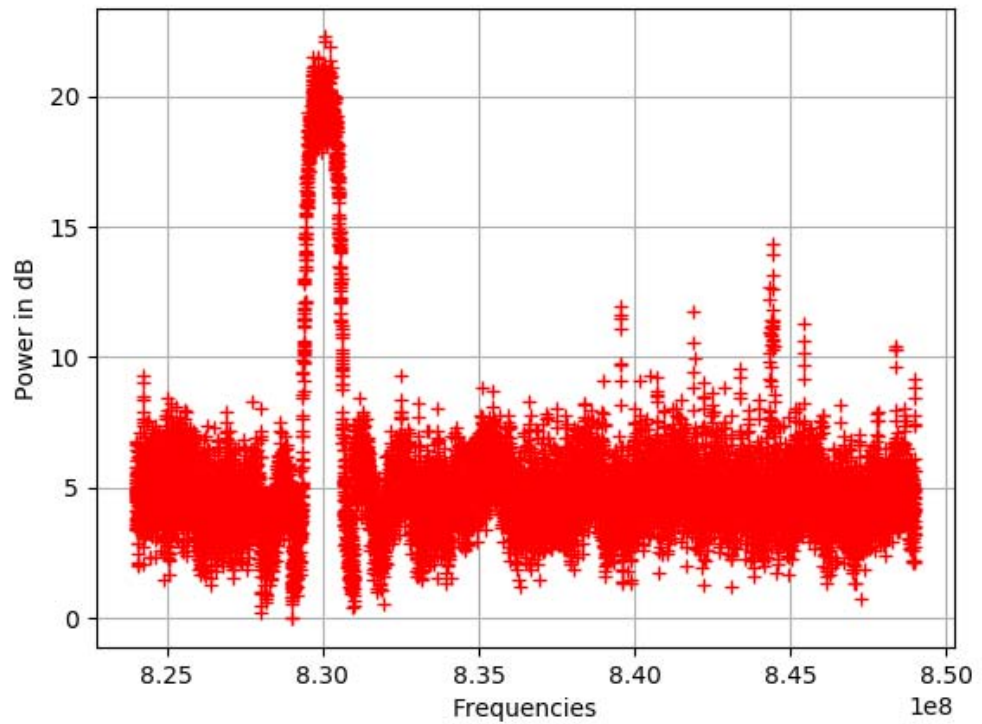
Εικόνα 3. 3. 11

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 5MHz, FFT Size 256 bins.



Εικόνα 3. 3. 12

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 1MHz, FFT Size 256 bins.

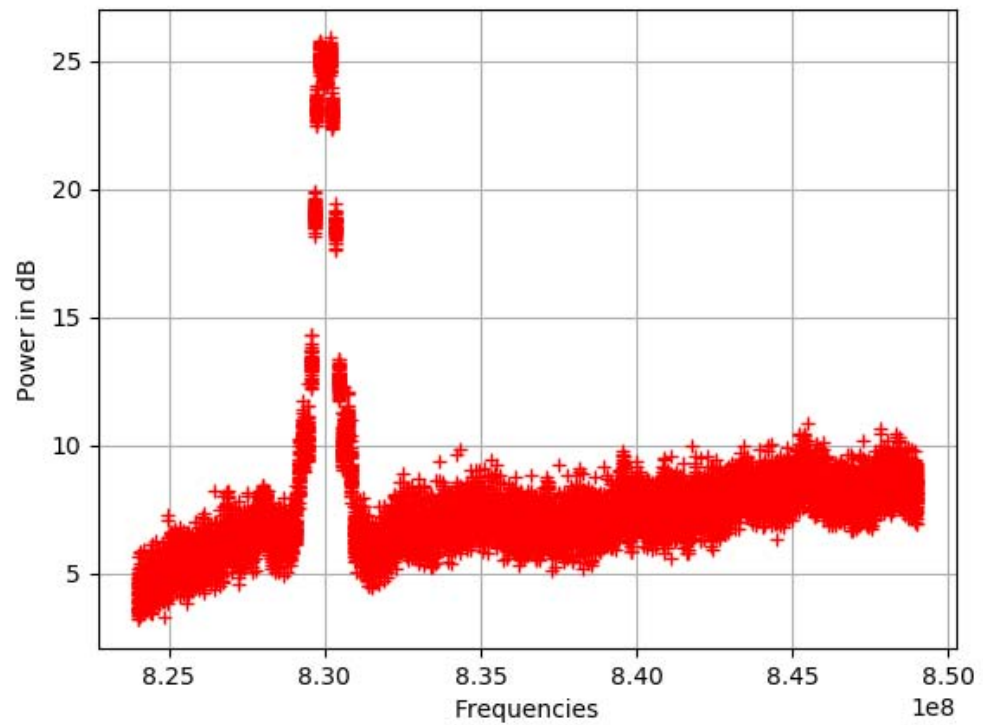


Εικόνα 3. 3. 13



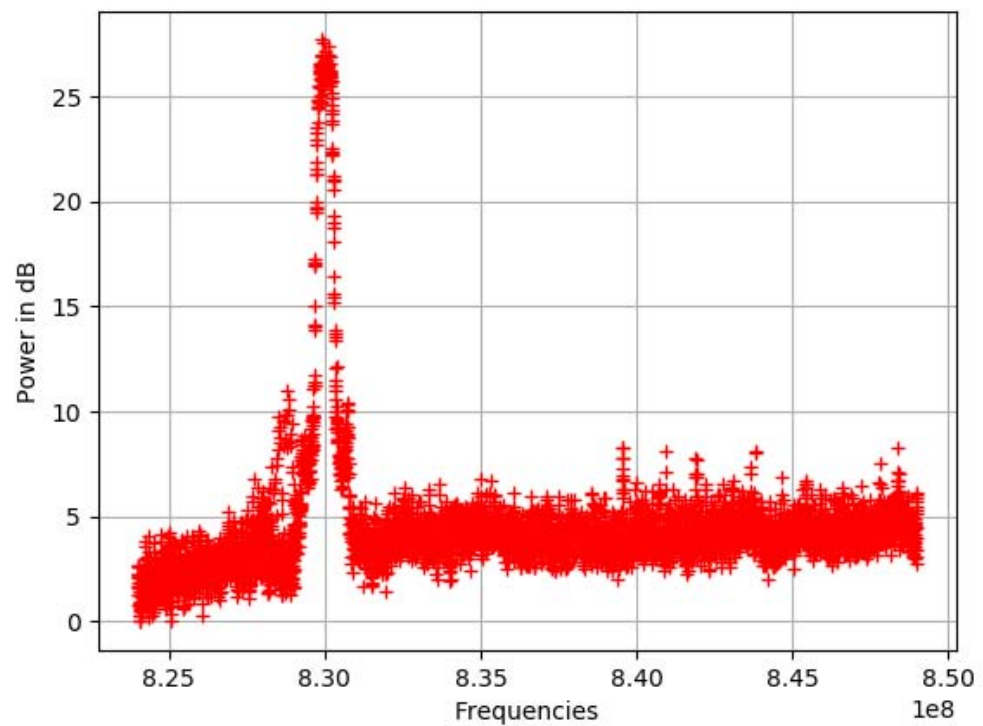
Μετάδοση στην συχνότητα 830MHz με πλάτος (Bandwidth) 0.5MHz.

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 25MHz, FFT Size 256 bins.



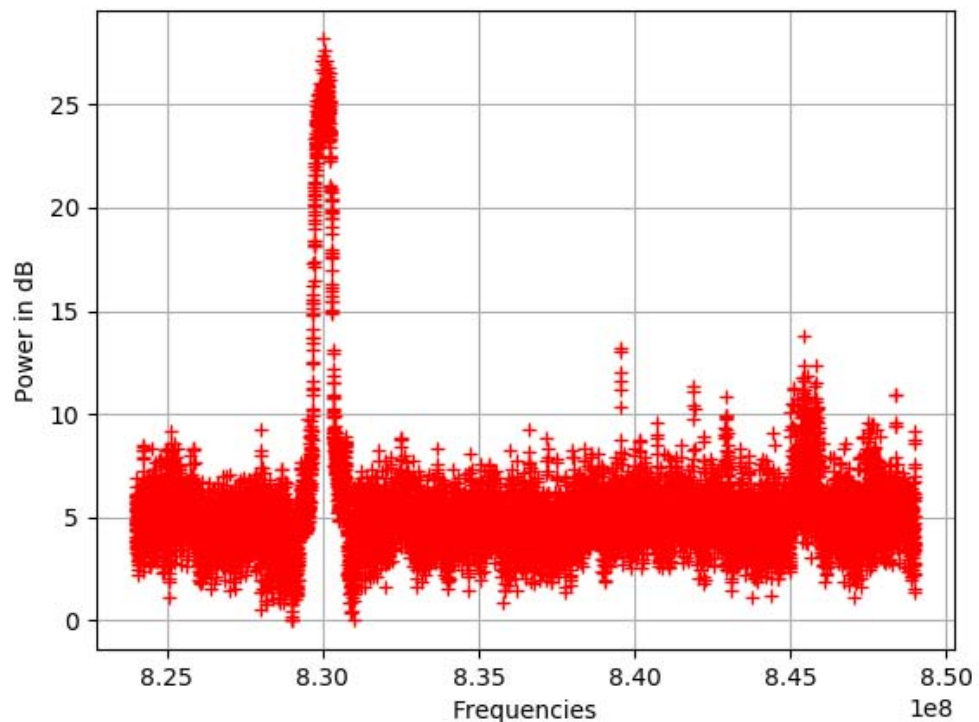
Εικόνα 3. 3. 14

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 5MHz, FFT Size 256 bins.



Εικόνα 3. 3. 15

- Monitor: 824MHz – 849MHz , Sample Rate 1MHz, FFT Size 256 bins.



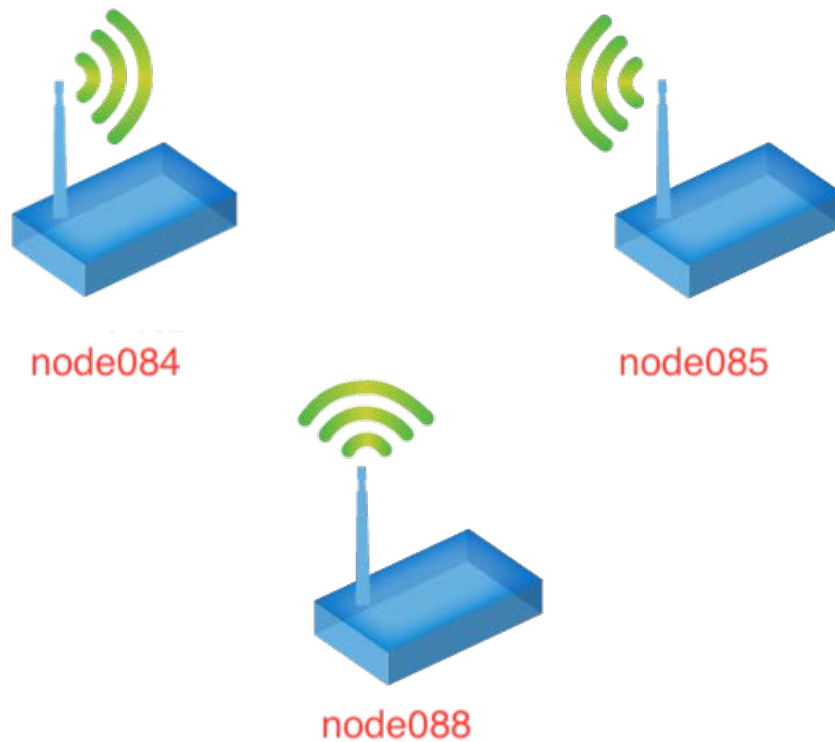
Εικόνα 3. 3. 16

Σε όλα τα στιγμιότυπα είναι εμφανές το πλάτος εκπομπής, στις περιπτώσεις όμως που το sample rate είναι μικρότερο από το πλάτος της μεταδώσεως παρατηρούμε μια περίεργη μορφή στο σχήμα που δεν μπορεί εύκολα να εξηγηθεί. Ο λόγος γίνεται για τα σχήματα Bandwidth 3, Sample Rate 1MHz, FFT Size 256 και Bandwidth 2, Sample Rate 1MHz, FFT Size 256. Αυτό το σχήμα δεν είναι ανταποκρίνεται στην πραγματική κατάσταση και το πρόβλημα είναι ο τρόπος που λειτουργεί ο αλγόριθμος, εξετάζοντας το φάσμα ανά 1 MHz παίρνουμε διαφορετικές φάσεις της μεταδώσεως.

### 3.4) LTE

Για το τέλος θα προσπαθήσουμε να παρατηρήσουμε την δραστηριότητα εκπομπής ενός σταθμού LTE που υποστηρίζει διπλεξία συχνότητας (FDD), είναι μια τεχνική όπου χρησιμοποιούνται ξεχωριστές ζώνες συχνοτήτων στην πλευρά του πομπού και του δέκτη. Στον κόμβο 084 θα πραγματοποιήσουμε τρεις μεταδόσεις με μήκος καναλιού 5 MHz, 10MHz

και 20 MHz.

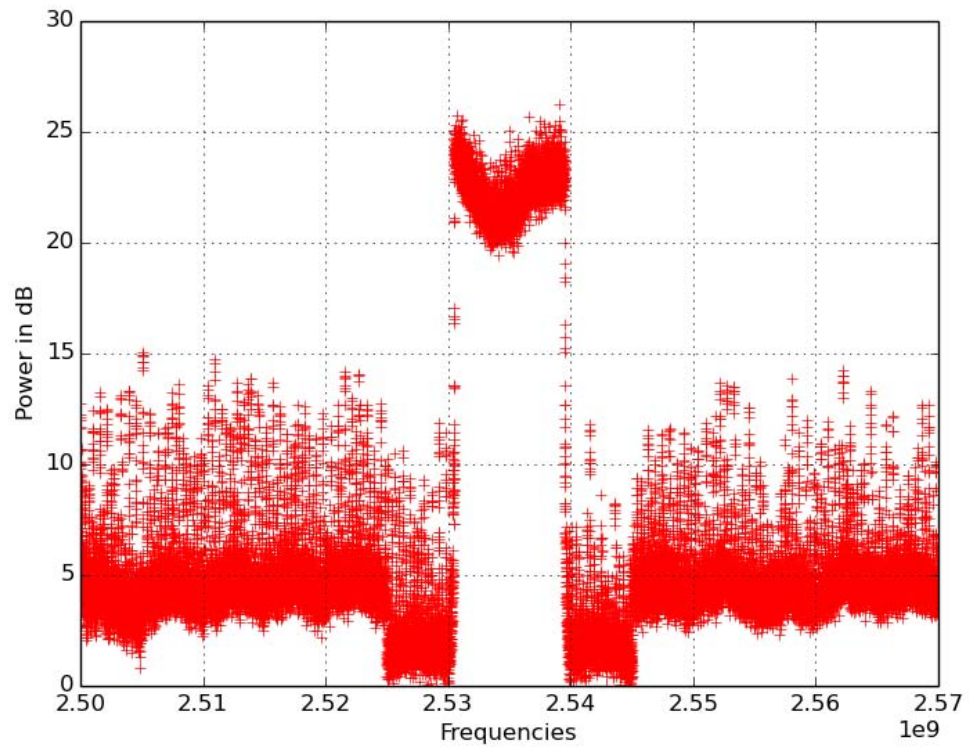


Εικόνα 3. 4. 1

Πρέπει να πούμε ότι οι συχνότητες 2500 MHz – 2570 MHz δεσμεύονται για τα κανάλια αποστολής (uplink) και οι συχνότητες 2620 MHz – 2690 MHz για τα κανάλια παραλαβής (downlink). Τα παρακάτω στιγμιότυπα έχουν δημιουργηθεί από το πρόγραμμα μας, ορίζοντας το FFT Size στα 512 bins στα και το sample rate στα 5 MHz, 10 MHz και 20 MHz.

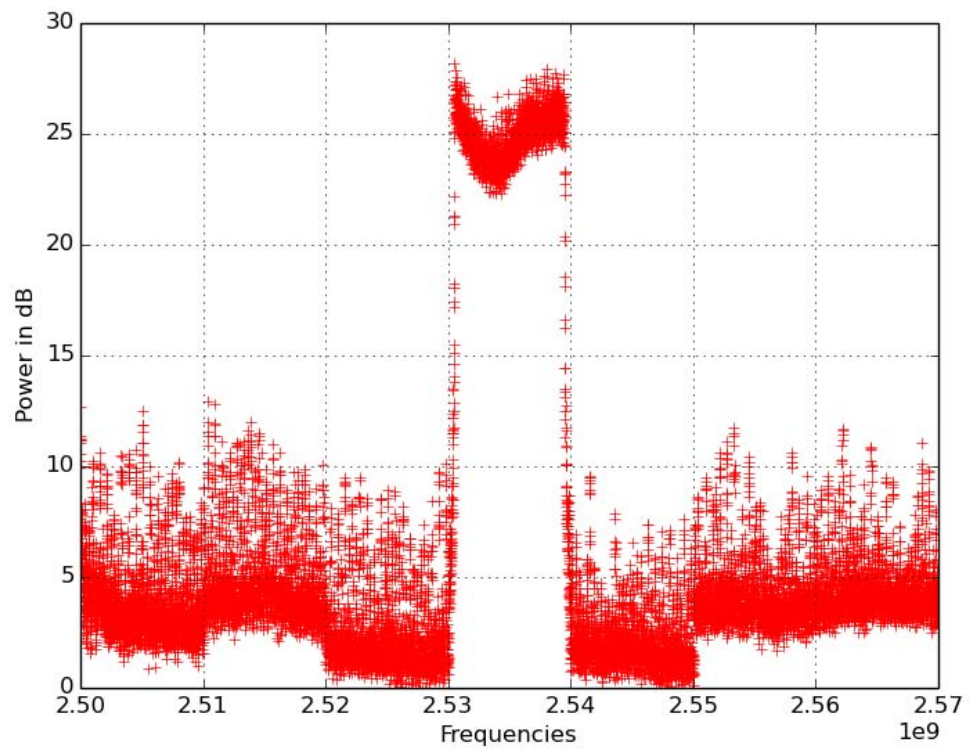
Μετάδοση στην συχνότητα 2555MHz του DownLink Channel (2500MHz – 2570MHz) με πλάτος 10MHz.

- Monitor: 2500MHz – 2570MHz , Sample Rate 20MHz, FFT Size 512 bins.



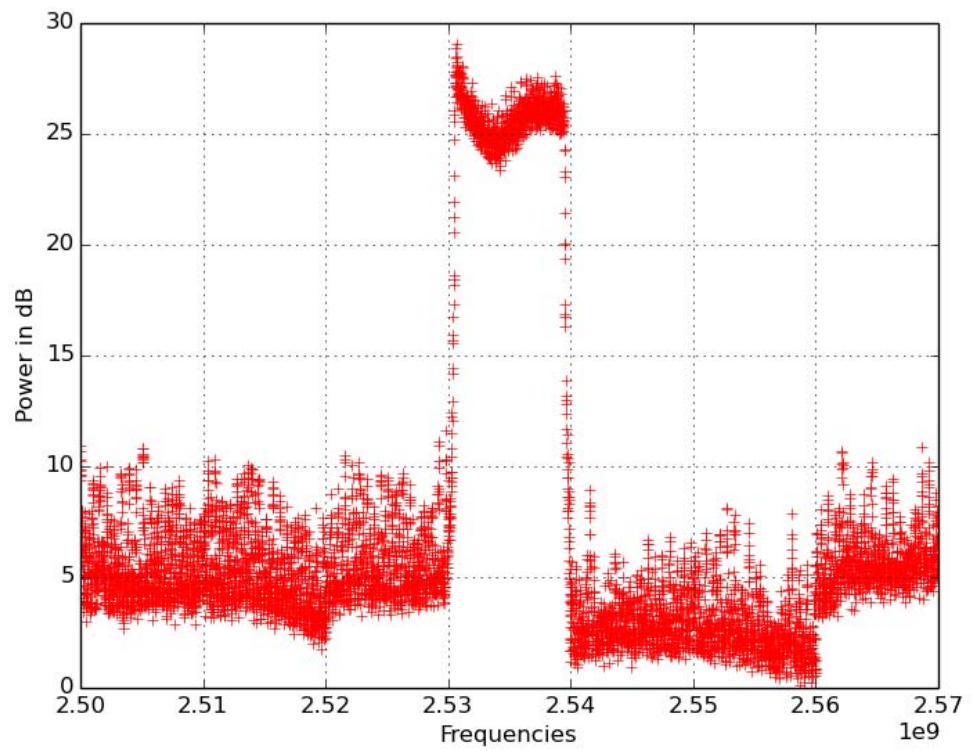
Εικόνα 3. 4. 2

- Monitor: 2500MHz – 2570MHz , Sample Rate 10MHz, FFT Size 512 bins.



Εικόνα 3. 4. 3

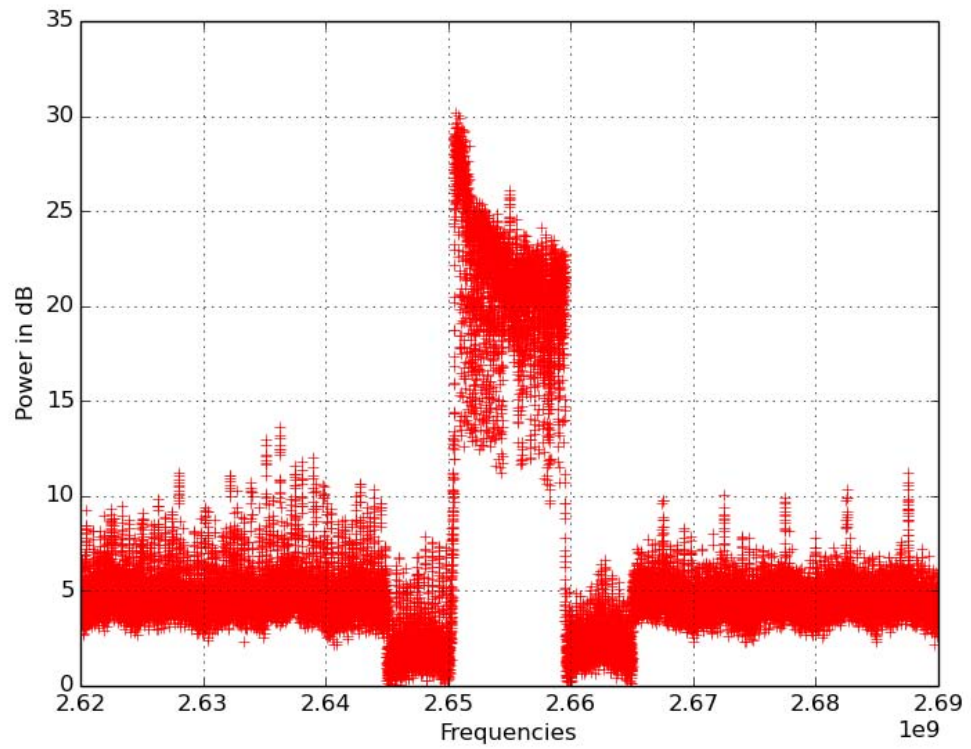
- Monitor: 2500MHz – 2570MHz , Sample Rate 5MHz, FFT Size 512 bins.



Εικόνα 3. 4. 4

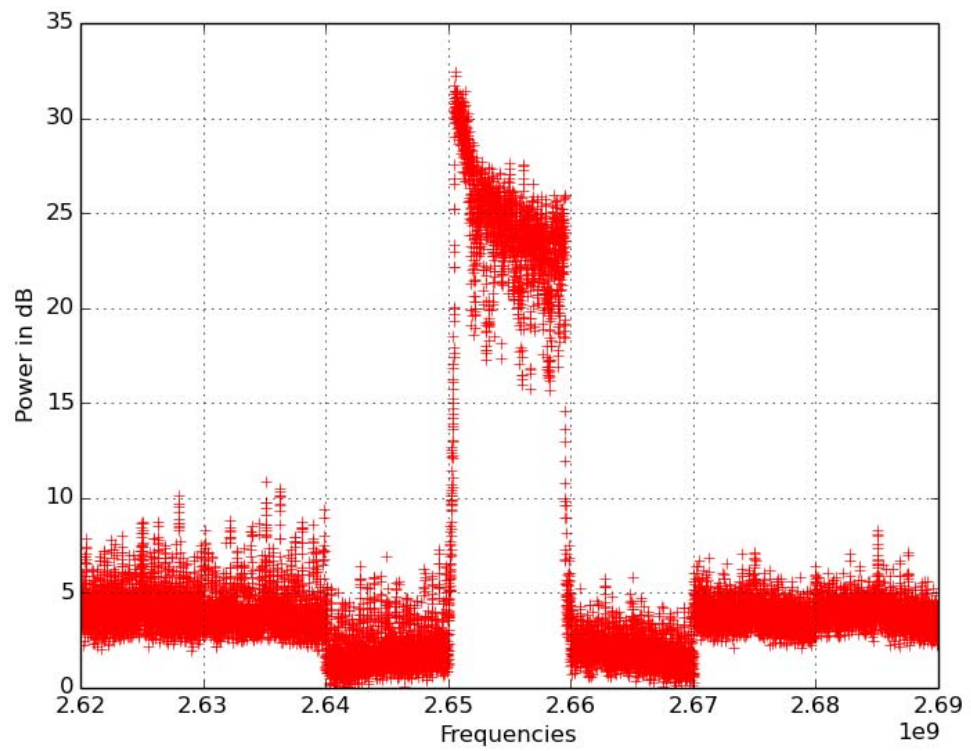
Μετάδοση στην συχνότητα 2655MHz του UpLink Channel (2620MHz – 2690MHz) με πλάτος 10MHz.

- Monitor: 2620MHz – 2690MHz , Sample Rate 20MHz, FFT Size 512 bins.



Εικόνα 3. 4. 5

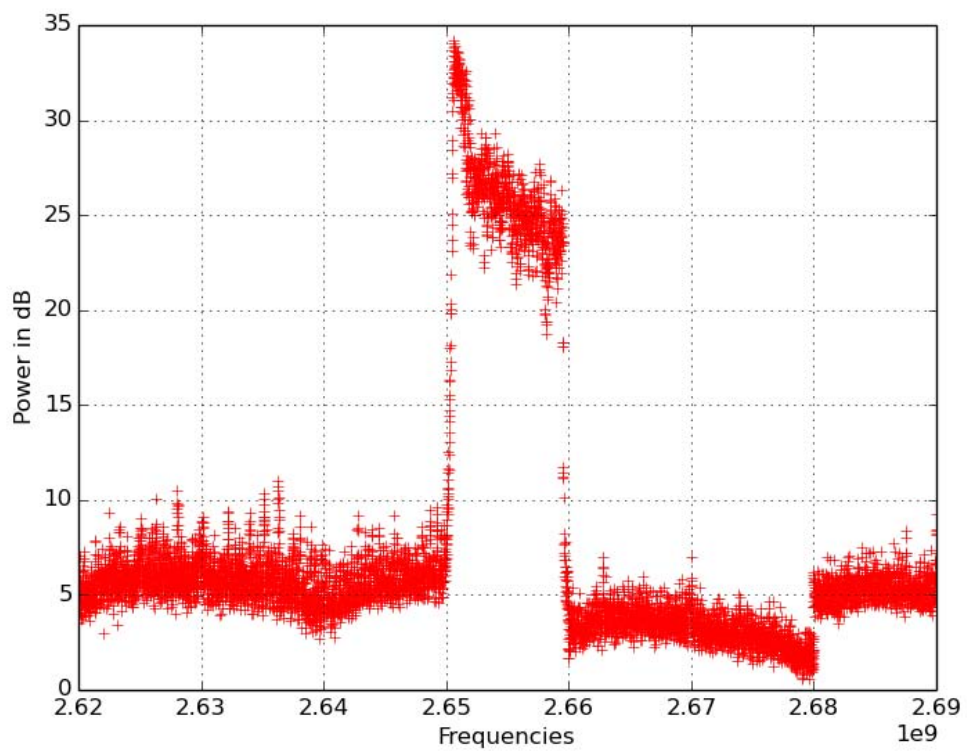
- Monitor: 2620MHz – 2690MHz , Sample Rate 10MHz, FFT Size 512 bins.



Εικόνα 3. 4. 6



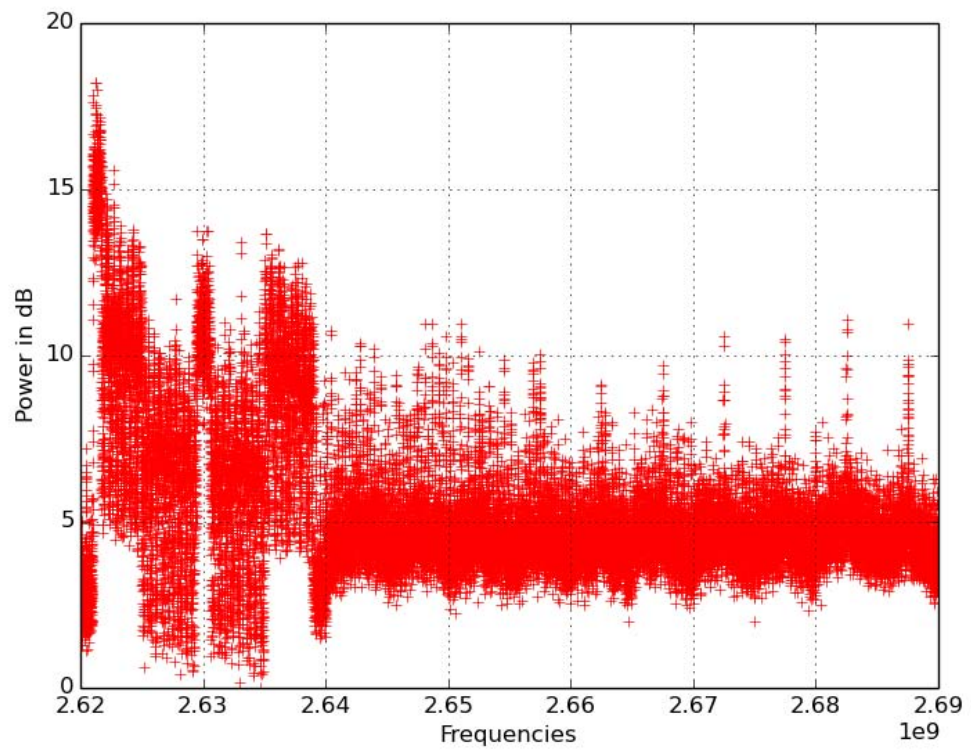
- Monitor: 2620MHz – 2690MHz , Sample Rate 5MHz, FFT Size 512 bins.



Εικόνα 3. 4. 7

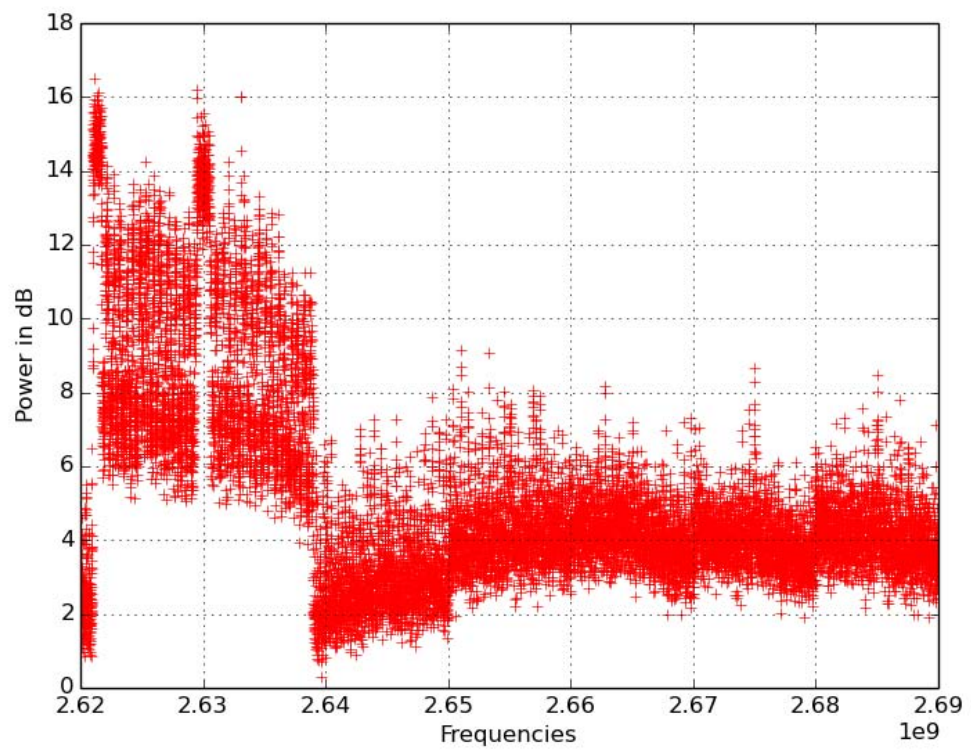
Μετάδοση στην συχνότητα 2630MHz του UpLink Channel (2620MHz – 2690MHz) με πλάτος 20MHz.

- Monitor: 2620MHz – 2690MHz , Sample Rate 20MHz, FFT Size 512 bins.



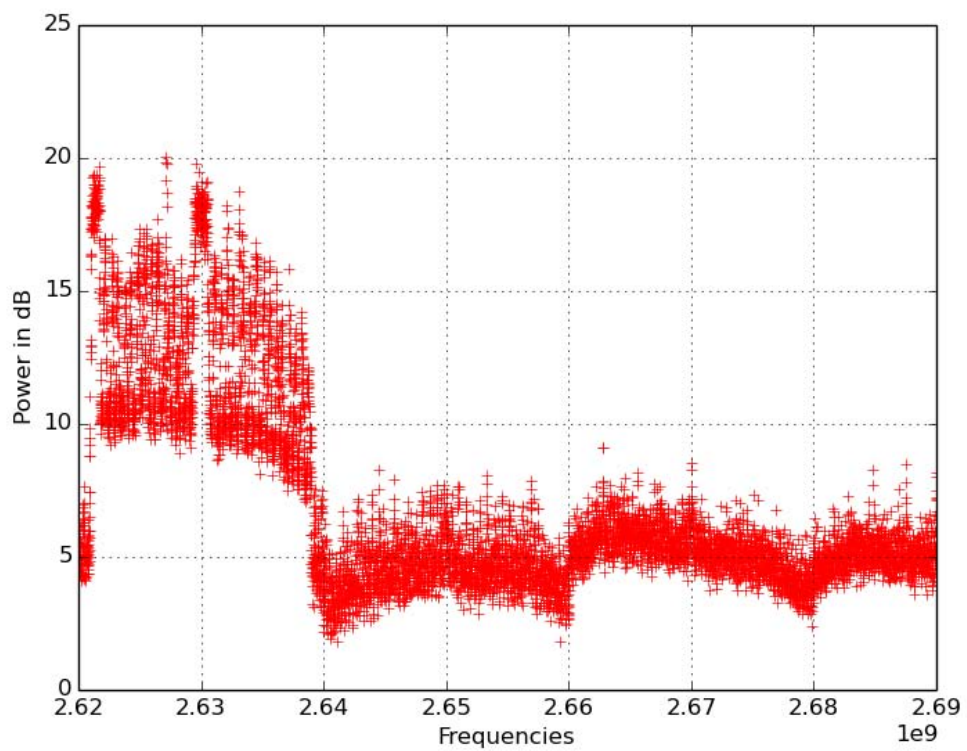
Εικόνα 3. 4. 8

- Monitor: 2620MHz – 2690MHz , Sample Rate 10 MHz, FFT Size 512 bins.



Εικόνα 3. 4. 9

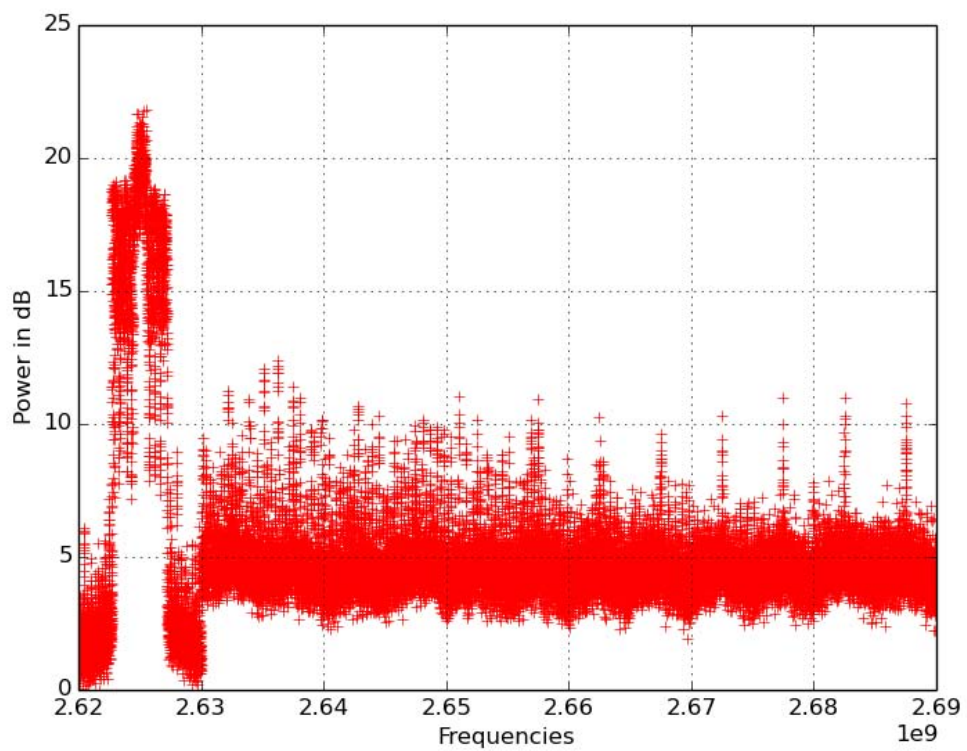
- Monitor: 2620MHz – 2690MHz , Sample Rate 5MHz, FFT Size 512 bins.



Εικόνα 3. 4. 10

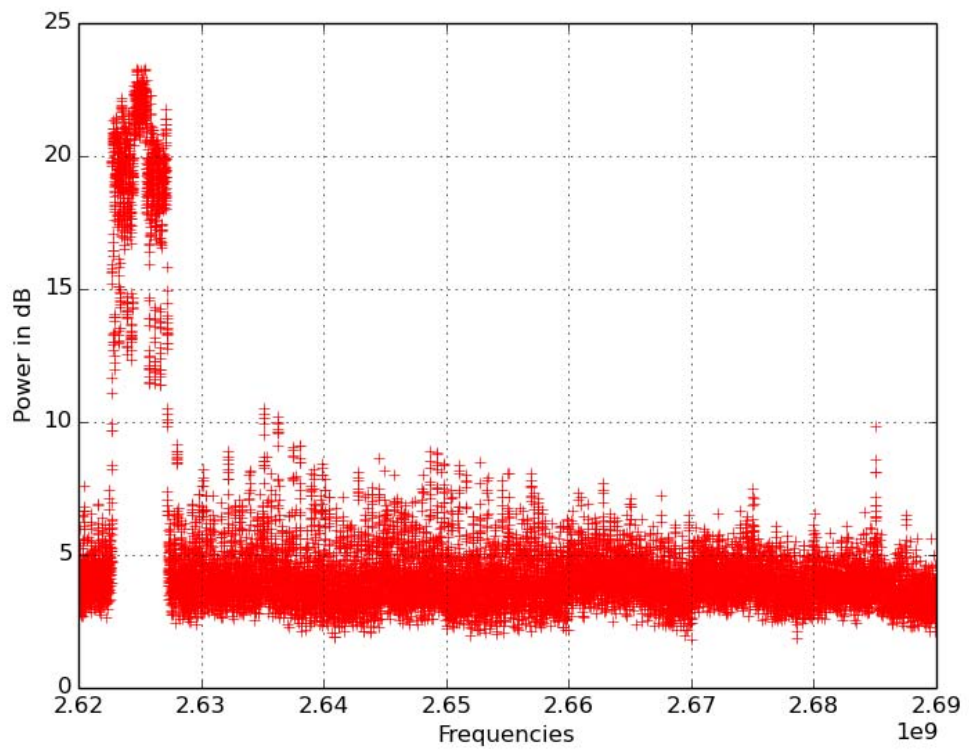
Μετάδοση στην συχνότητα 2630MHz του UpLink (2620MHz – 2690MHz) με πλάτος 5MHz.

- Monitor: 2620MHz – 2690MHz , Sample Rate 20MHz, FFT Size 512 bins.



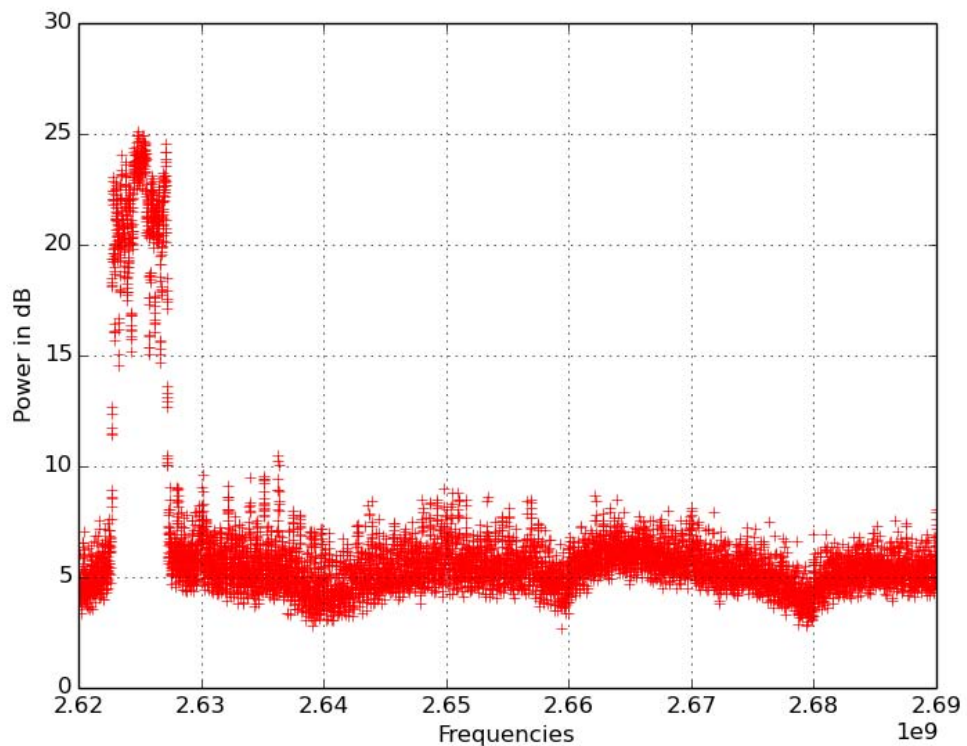
Εικόνα 3. 4. 11

- Monitor: 2620MHz – 2690MHz , Sample Rate 10MHz, FFT Size 512 bins.



Εικόνα 3. 4. 12

- Monitor: 2620MHz – 2690MHz , Sample Rate 5MHz, FFT Size 512 bins.



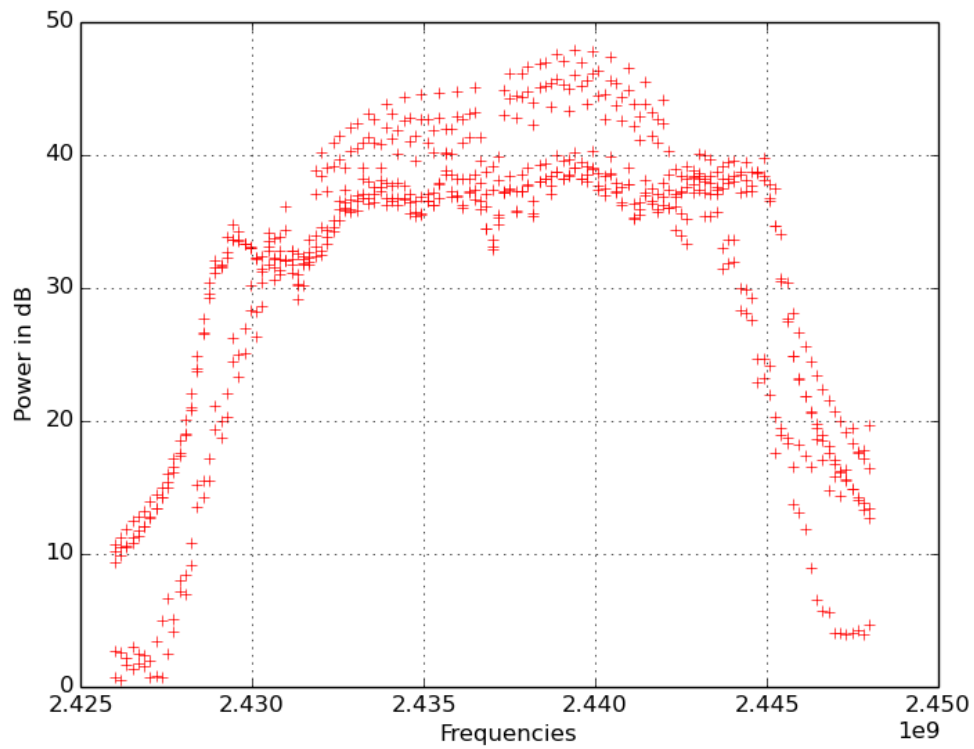
Εικόνα 3. 4. 13

### 3.5) Παρακολούθηση φάσματος χωρίς αλλαγή συχνότητας

Η ιδιαιτερότητα που έχουν τα παρακάτω αποτελέσματα και βρίσκονται σε ξεχωριστή ενότητα, είναι το μέγεθος του sample rate και τα όρια των συχνοτήτων που θα λειτουργήσει ο αλγόριθμος μας. Ουσιαστικά επικεντρωνόμαστε σε ένα μόνο ένα κανάλι για να λάβουμε τα αποτελέσματα δηλαδή το φάσμα συχνοτήτων προς εξέταση δεν διαμοιράζεται σε μικρότερα κομμάτια και τα αποτελέσματα προκύπτουν από μια χρονική στιγμή. Έτσι δεν πρόκειται να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα που είδαμε στην εικόνα 3.7.γ και 3.8.γ όπου βλέπουμε μια ανωμαλία .

### Μετάδοση Wi-Fi στο κανάλι 6 (2437MHz-2459MHz)

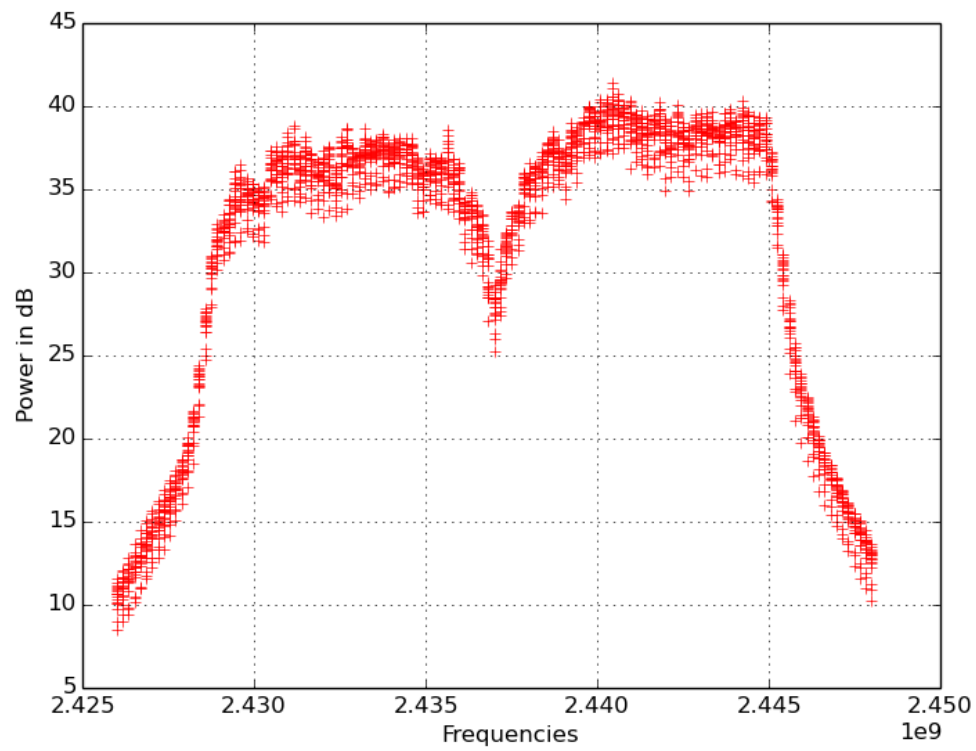
- Monitor: 2.437 MHz-2.459 MHz(Channel 6 of Wi-Fi), Sample Rate 22 MHz, FFT Size 128



Εικόνα 3. 5. 1

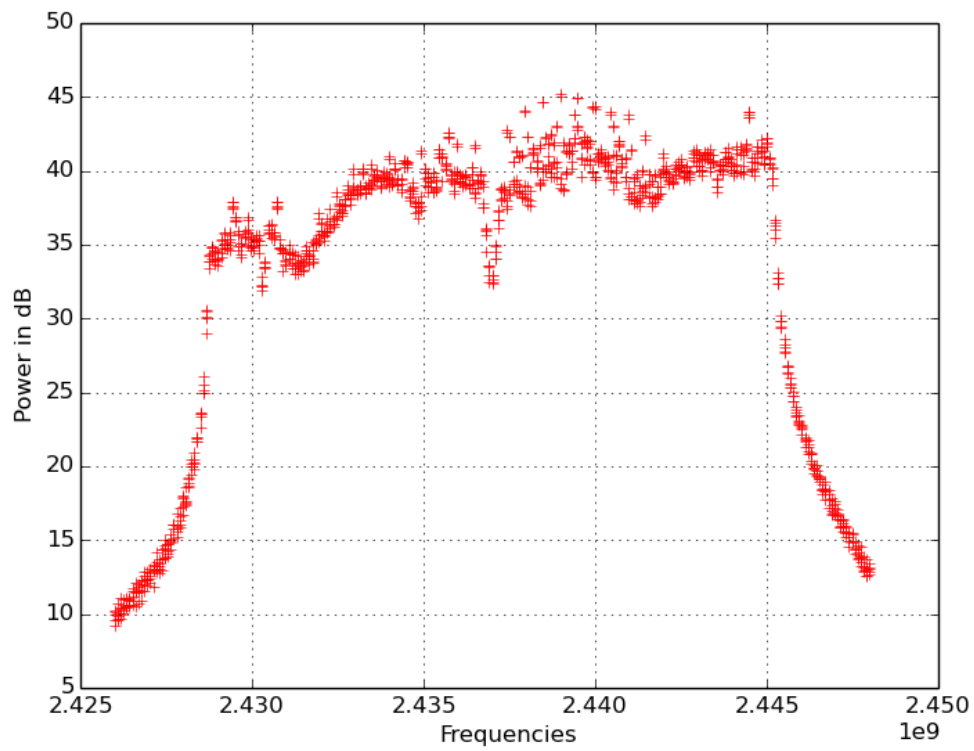


- Monitor: 2.437 MHz-2.459 MHz(Channel 6 of Wi-Fi), Sample Rate 22 MHz, FFT Size 128, Time 10s



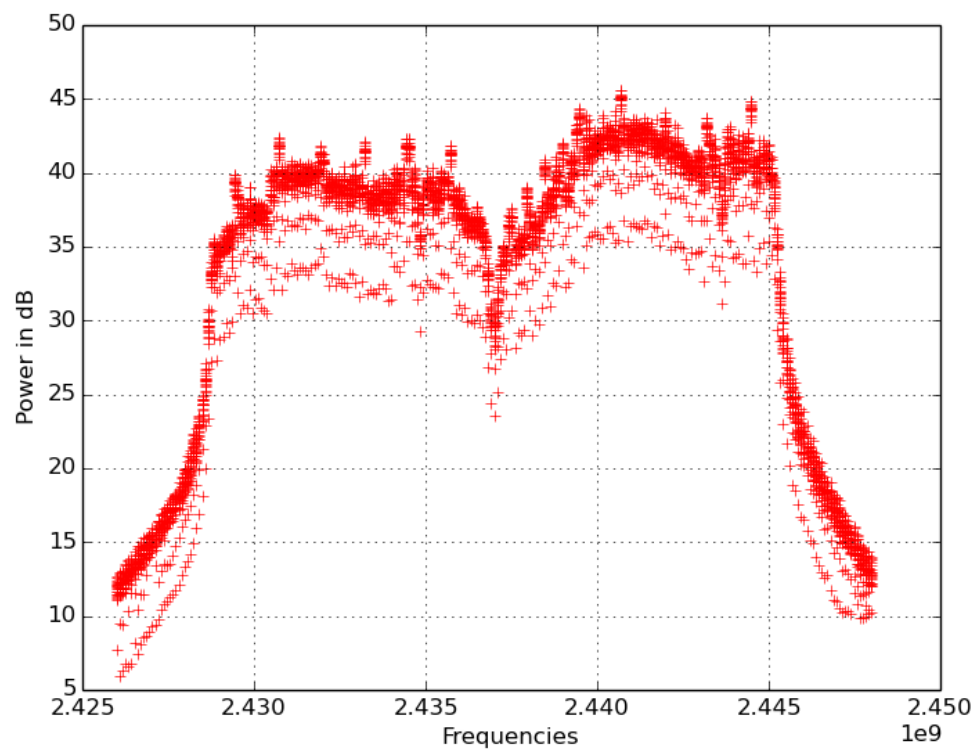
Εικόνα 3. 5. 2

- Monitor: 2.437 MHz-2.459 MHz(Channel 6 of Wi-Fi), Sample Rate 22 MHz, FFT Size 256



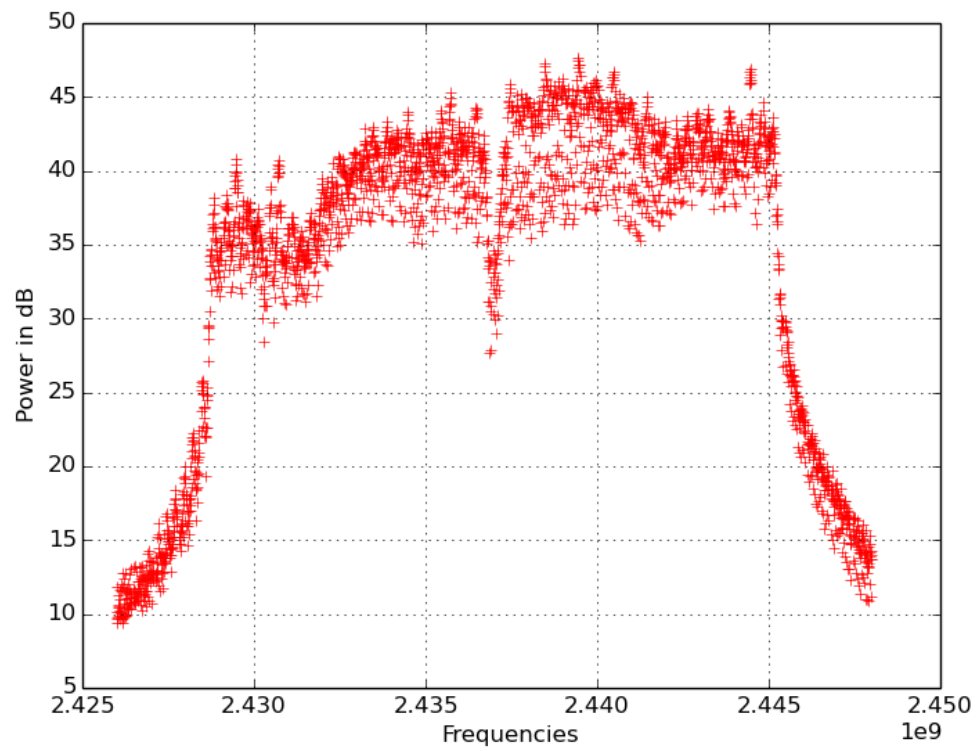
Εικόνα 3. 5. 3

- Monitor: 2.437 MHz-2.459 MHz(Channel 6 of Wi-Fi), Sample Rate 22 MHz, FFT Size 256, Time 10s



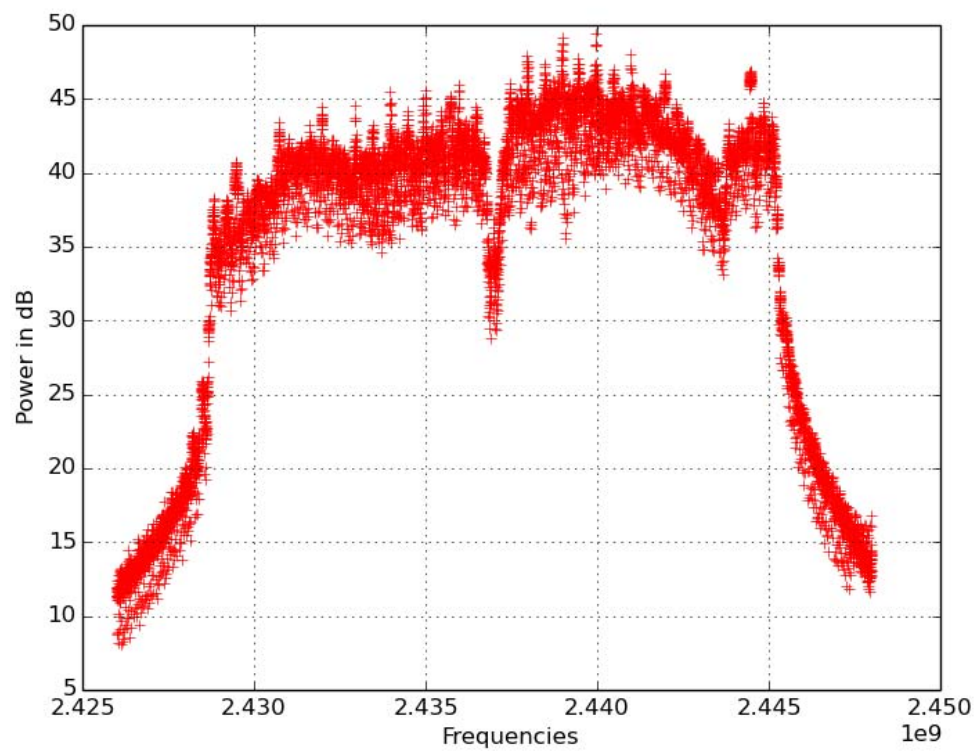
Εικόνα 3. 5. 4

- Monitor: 2.437 MHz-2.459 MHz(Channel 6 of Wi-Fi), Sample Rate 22 MHz, FFT Size 512



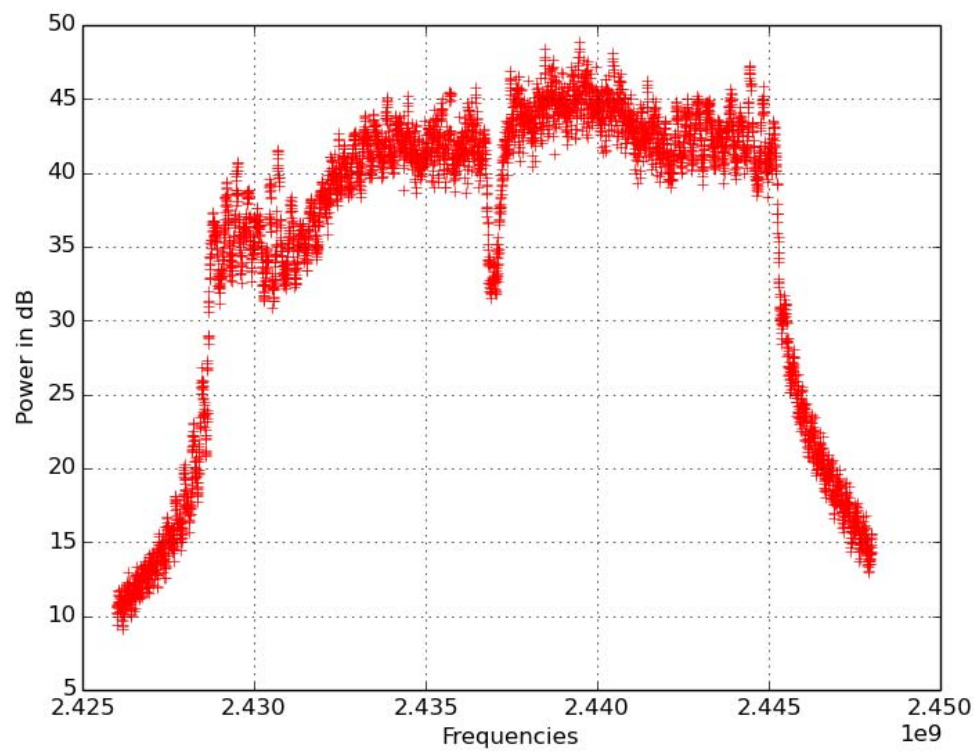
Εικόνα 3. 5. 5

- Monitor: 2.437 MHz-2.459 MHz(Channel 6 of Wi-Fi), Sample Rate 22 MHz, FFT Size 512, Time 10s



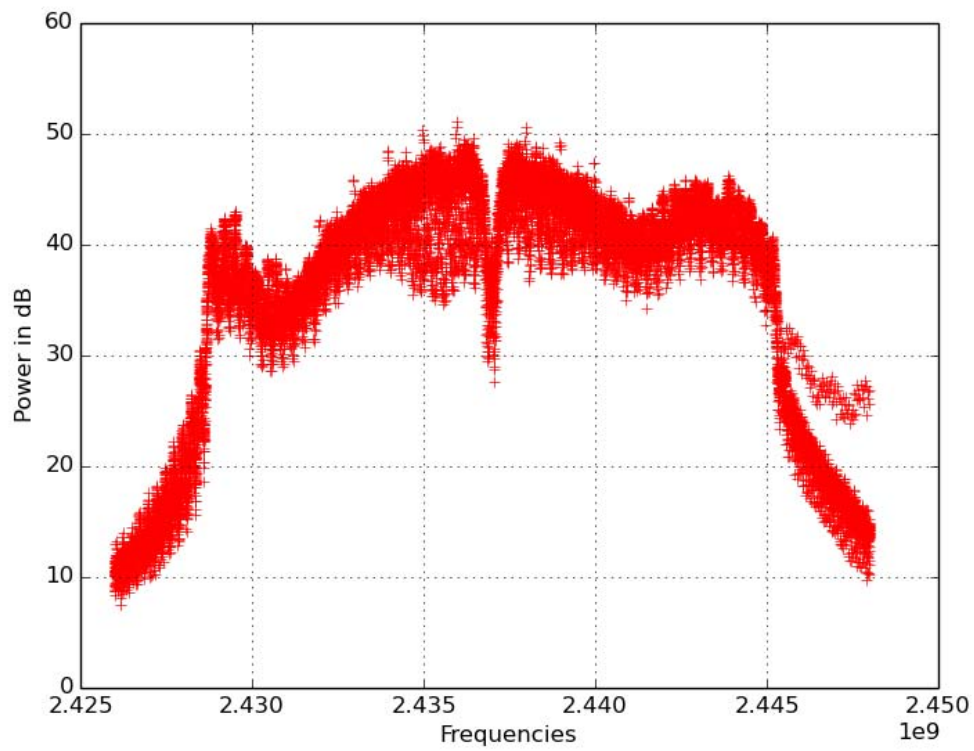
Εικόνα 3. 5. 6

- Monitor: 2.437 MHz-2.459 MHz(Channel 6 of Wi-Fi), Sample Rate 22 MHz, FFT Size 1024



Εικόνα 3. 5. 7

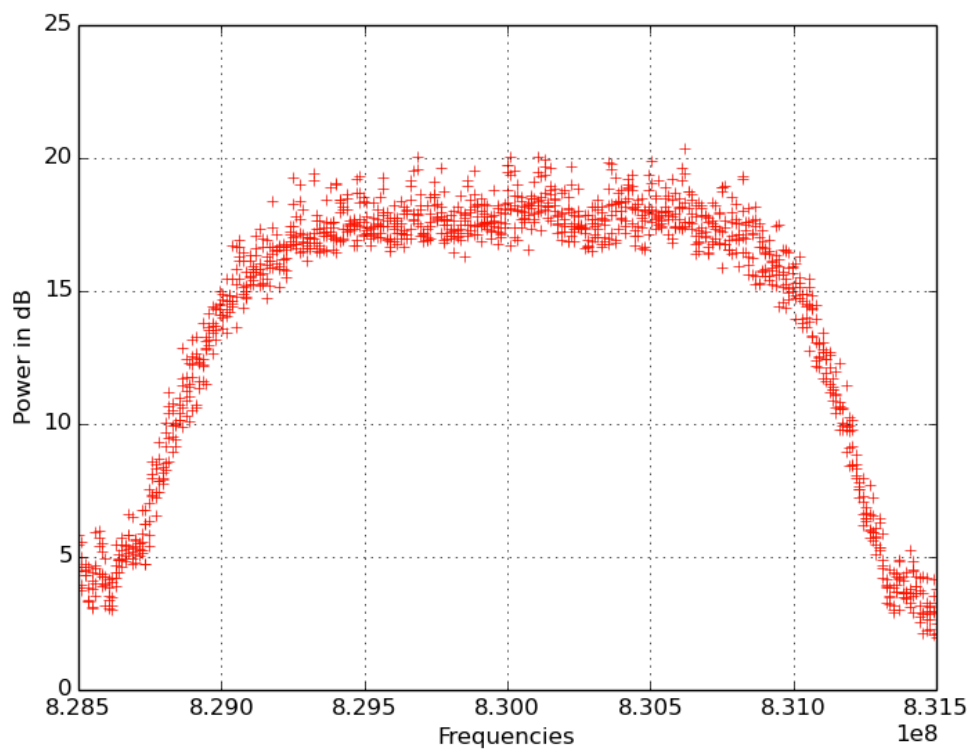
- Monitor: 2.437 MHz-2.459 MHz(Channel 6 of Wi-Fi), Sample Rate 22 MHz, FFT Size 1024, Time 10s



Εικόνα 3. 5. 8

Μετάδοση Narrowband στην συχνότητα 830MHz με πλάτος 2MHz.

- Monitor: 830 MHz-833 MHz, Sample Rate 3 MHz, FFT Size 256



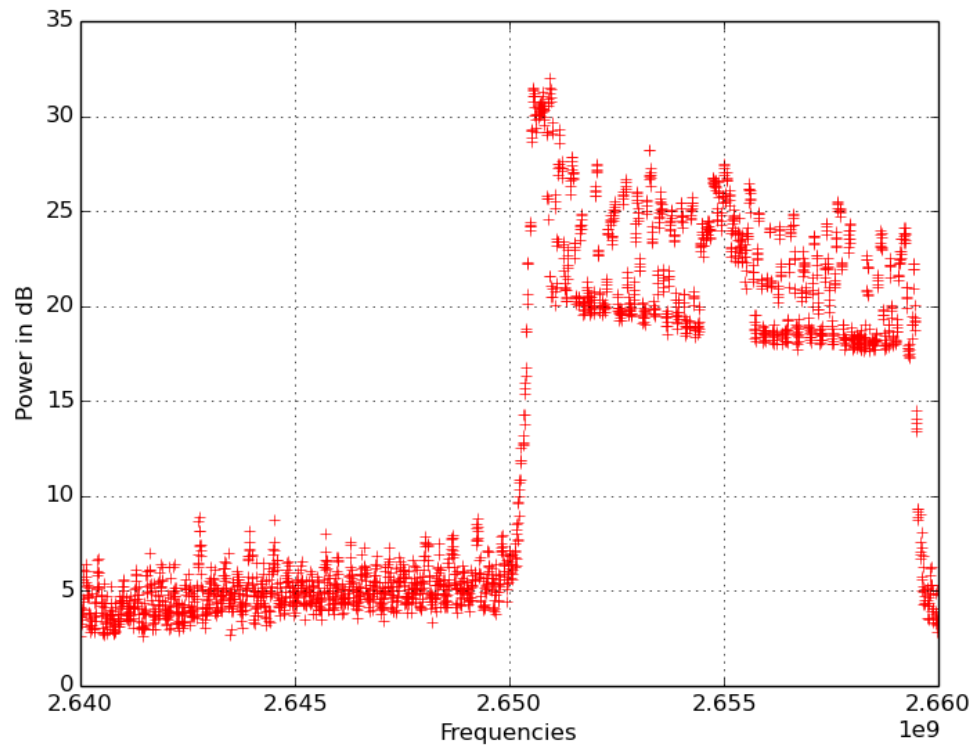
Εικόνα 3. 5. 9



## LTE

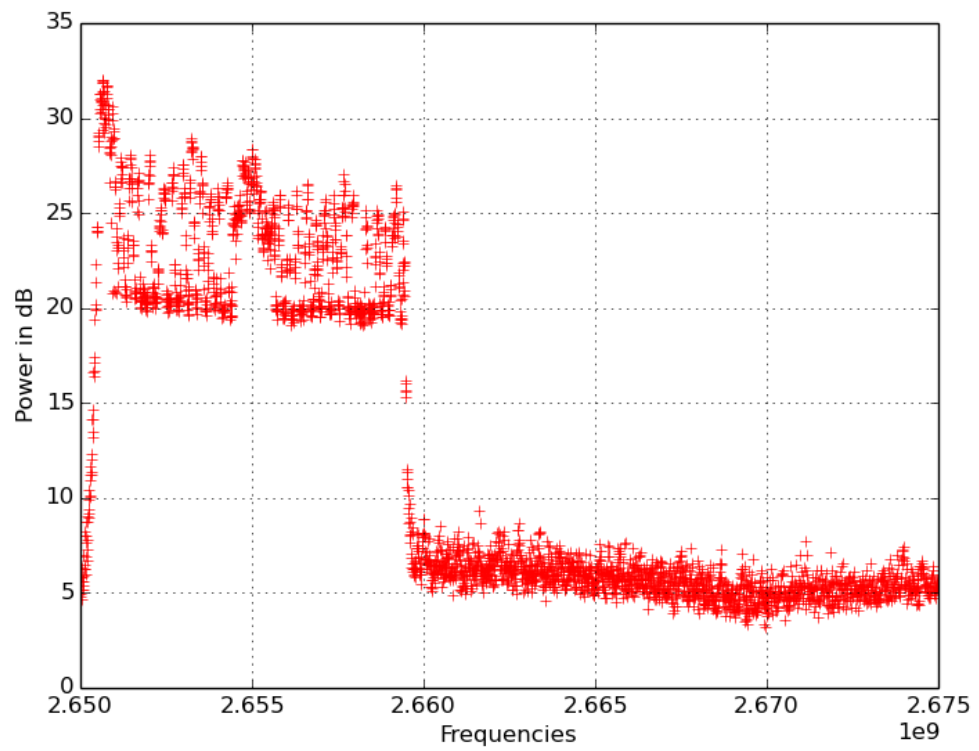
Μετάδοση στην συχνότητα 2655MHz του UpLink Channel (2620MHz – 2690MHz) με πλάτος 10MHz.

- Monitor: 2650MHz – 2670MHz , Sample Rate 20MHz, FFT Size 512 bins.



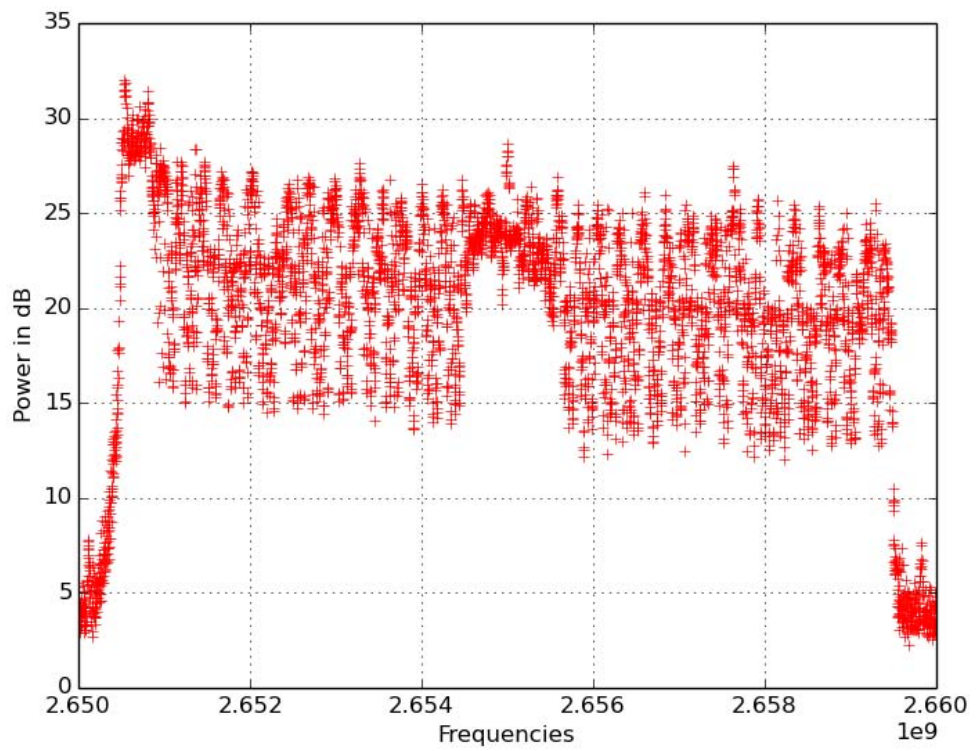
Εικόνα 3. 5. 10

- Monitor: 2650MHz – 2675MHz , Sample Rate 20MHz, FFT Size 512 bins.



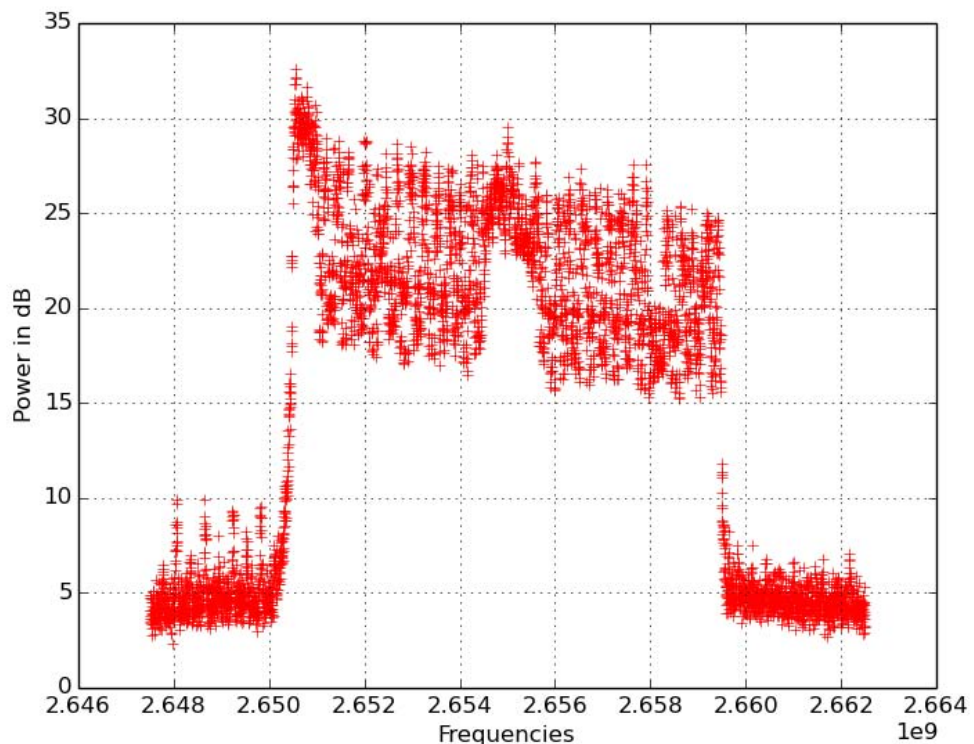
Εικόνα 3. 5. 11

- Monitor: 2650MHz – 2660MHz , Sample Rate 10MHz, FFT Size 1024 bins.



Εικόνα 3. 5. 12

- Monitor: 2655MHz – 2670MHz , Sample Rate 15MHz, FFT Size 1024 bins.



Εικόνα 3. 5. 13

#### 4) Συμπεράσματα

Κλείνοντας πρέπει να γίνει απόλυτα κατανοητή η χρησιμότητα μιας τέτοιας πλατφόρμας παρακολούθησης του φάσματος για την ανάπτυξη συνεργατικών δικτύων. Που σκοπό τους έχουν να βελτιώσουν τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες επικοινωνίας που μαστίζονται από τον περιορισμό που επιβάλλει το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα .Με σωστή λειτουργία της πλατφόρμας, μέσα από την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας, ο χρήστης μπορεί να είναι βέβαιος ότι μπορεί εύκολα και με ικανοποιητική ακρίβεια να αντιληφθεί την κατάσταση που επικρατεί στο περιβάλλον του και να προσαρμοστεί ανάλογα. Έχοντας υπόψιν μας τις ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις αλλά και την μεγάλη ποικιλία των διαφορετικών τεχνολογιών, προσπαθήσαμε να καλύψουμε ένα μεγάλο μέρος των αναγκών και σίγουρα υπάρχει περιθώριο εξέλιξης.

## Βιβλιογραφία

- [1] En.wikipedia.org. (2019). Radio spectrum. [online] Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Radio\\_spectrum](https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum) [Accessed 21 Feb. 2019].
- [2] En.wikipedia.org. (2019). *Cognitive radio*. [online] Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive\\_radio](https://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_radio) [Accessed 21 Feb. 2019].
- [3] En.wikipedia.org. (2019). Software-defined radio. [online] Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined\\_radio](https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio) [Accessed 21 Feb. 2019].
- [4] GNU Radio. (2019). About GNU Radio · GNU Radio. [online] Available at: <https://www.gnuradio.org/about/> [Accessed 21 Feb. 2019].
- [5] Ettus.com. (2019). [online] Available at: [https://www.ettus.com/content/files/b200-b210\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.ettus.com/content/files/b200-b210_spec_sheet.pdf) [Accessed 21 Feb. 2019].
- [6] En.wikipedia.org. (2019). *Universal Software Radio Peripheral*. [online] Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_Software\\_Radio\\_Peripheral](https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Software_Radio_Peripheral) [Accessed 21 Feb. 2019].
- [7] Yucek, T. and Arslan, H. (2009). A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1), pp.116-130.
- [8] Dong, Shuya & Wu, Xiaoqin & Bai, Yong. (2016). Wideband Spectrum Sensing by Multistep Frequency Domain Energy Detection in GNU Radio. *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS*. 15.